



Luís Filipe Milheiro Gonçalves

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Civil - Perfil Construção

Orientador: Luís Manuel Cordeiro Matias, Investigador Auxiliar, Laboratório
Nacional de Engenharia Civil

Co-orientadora: Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues, Professora
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Santana
Arguente: Professor Doutor Fernando M. A. Henriques
Vogal: Doutor Luís Matias



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Julho de 2014

Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes em fachadas por análise termográfica.

“Copyright” Luís Filipe Milheiro Gonçalves, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, Hélder e Maria de Fátima.

Agradecimentos

Finalizada esta etapa, considero importante enumerar as pessoas que directa ou indirectamente, me ajudaram e me acompanharam, ao longo da minha vida, do meu percurso académico, e a realizar este objectivo pessoal.

Assim, começo por prestar um especial agradecimento ao Doutor Luís Matias, orientador científico do presente trabalho, pela total disponibilidade e auxílio durante a sua elaboração, pelo conhecimento transmitido e pela simpatia demonstrada.

À Professora Doutora Paulina Faria, co-orientadora científica, pelo conhecimento transmitido e pela disponibilidade ilimitada. Ao Doutor António Santos e ao bolseiro Jorge Amaral pela ajuda incansável em todo o desenvolvimento experimental realizado no NAICI (Núcleo de Acústica, Iluminação, Componentes e Instalações) e no NRI (Núcleo de Revestimentos e Isolamentos). Saliento ainda o contributo da bolseira Joana Pereira nos ensaios de espectrofotometria. Gostaria de agradecer também ao técnico José Carlos pelo seu sentido prático e disponibilidade, que facilitaram muito a execução do trabalho realizado. À Doutora María del Mar Barbero-Barrera e à Universidad Politécnica de Madrid pela ajuda e pela disponibilização do equipamento emissómetro modelo AE.

O meu agradecimento ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, particularmente ao Departamento de Edifícios, pelo acolhimento durante a realização desta dissertação e a todos que directa ou indirectamente, contribuíram para o desenvolver do trabalho.

Um obrigado à Ana Melrinho pelo apoio no desenvolver do trabalho realizado. Aos meus colegas e amigos que sempre me apoiaram ao longo desta longa viagem, e tornaram esta experiência memorável e nunca aborrecida, em especial, aos que me acompanharam em todo este percurso: André Trepado, Carlos Mata, Gonçalo Telo, Mafalda Parda, Viviana Delgado, Pedro Romão e Mário Ferreira.

O meu profundo agradecimento aos meus pais, por todo o apoio, carinho e valores inculcados ao longo da minha vida. Um agradecimento especial à minha mãe, pela inabalável confiança e amor depositados em mim; um farol nesta minha viagem. Um agradecimento especial ao meu pai, que me ensinou a acreditar, em mim e nos outros, e que *“amanhã deves aspirar a algo melhor que hoje”*. A ele, mais que todos, dedico este trabalho.

Resumo

Actualmente, são usadas em coberturas planas tintas de elevada reflectância (*cool paints*), com o intuito de reduzir os ganhos térmicos resultantes da incidência da radiação solar e, consequentemente, melhorar o conforto térmico e a eficiência energética nos edifícios, principalmente em períodos de verão.

Tendo em conta o potencial de aplicação destas tintas em fachadas (*cool facades*), foi desenvolvido, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), um estudo de investigação para avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes, sob condições reais de exposição. Nesse sentido, foram estudadas diversas tintas, na maioria caracterizadas por apresentarem uma elevada reflexão. Estas tintas foram aplicadas em fachadas, sobre uma solução de revestimento do tipo ETICS, de três células experimentais construídas à escala real.

Para avaliar o desempenho térmico das tintas aplicadas recorreu-se ao método de análise não destrutivo de Termografia de infravermelhos. A Termografia permite conhecer a distribuição de temperatura das fachadas, ao medir a radiação emitida pelas suas superfícies. Como apoio ao diagnóstico termográfico, colocaram-se termopares entre o isolamento térmico e o sistema de pintura das células experimentais. Testes laboratoriais adicionais permitiram a caracterização das propriedades radiativas (reflectância e emitância) das diferentes tintas reflectantes utilizadas neste estudo.

Nesta dissertação apresentam-se os resultados obtidos, nomeadamente da análise comparativa do contributo para o desempenho térmico entre tintas reflectantes e convencionais e demonstra-se o potencial da termografia de infravermelhos na avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes.

Verificou-se que as tintas reflectantes permitem reduzir a temperatura superficial da fachada, diminuindo o risco de perda das propriedades isolantes do sistema ETICS e garantindo a sua melhor funcionalidade e longevidade. A cor da tinta utilizada afecta, naturalmente, a capacidade reflectora da superfície, podendo desempenhar um papel importante no balanço energético do edifício.

Palavras chave:

Tinta reflectante, termografia de infravermelhos, desempenho térmico, fachada, ETICS

Abstract

Currently high reflective paints (*cool paints*) are being used on flat roofs in order to reduce heat gains resulting from the incidence of solar radiation and, thus, improving the thermal comfort and energy efficiency in buildings, especially in summer periods.

Considering the potential application of these paints in facades (*cool facades*), a research study was developed at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), to evaluate the thermal performance of reflective paints under real weathering conditions. Accordingly, various paints were studied, the majority characterized for having high reflection. These paints were applied on the facades, over a ETICS coating solution, of three full scale experimental cells which were previously built.

To evaluate the thermal performance of the applied paints, the method of non-destructive analysis of infrared thermography is used. Thermography allows knowing the temperature distribution of the facades, by measuring the radiation emitted by their surfaces. As support of the thermographic diagnostic, thermocouples were placed between the thermal insulation and the paint system of the experimental cells. Additional laboratory tests allowed the characterization of the radiative properties (reflectance and emittance) of the different paints used in this study.

This dissertation presents the results obtained, namely the comparative analysis of the contribution to thermal performance between reflective and conventional paints. It also demonstrated the potential of infrared thermography in the evaluation of the thermal performance of reflective paints.

It was found that reflective paints allows to reduce the surface temperature of the facade, decreasing the risk of loss of the insulating properties of the ETICS system and ensuring their best functionality and longevity. The color of the paint used, naturally, affects the reflective ability of the surface and may play an important role in the energy balance of the building.

Keywords:

Reflective paint, infrared thermography, thermal performance, facade, ETICS

Índice de Texto

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos e metodologia	2
1.3	Estrutura da dissertação	4
2	Desempenho térmico de tintas reflectantes	5
2.1	Introdução	5
2.2	Comportamento térmico de edifícios	5
2.2.1	Trocas de calor edifício-envolvente	6
2.2.2	Influência da tinta reflectante no comportamento térmico de um edifício	8
2.2.3	O espectro electromagnético	9
2.2.4	Radiação térmica	11
2.2.5	Radiação do corpo negro	13
2.2.6	Radiação do corpo não negro	15
2.3	Emitância	18
2.4	Reflectância	20
2.4.1	Comportamento de superfícies reflectantes	20
2.4.2	Factores que influenciam a reflectância	21
2.4.3	Influência da reflectância no desempenho térmico	23
3	Termografia de infravermelhos	25
3.1	Introdução	25
3.2	Análise termográfica	26
3.2.1	Condições requeridas	27
3.2.2	Método activo	29
3.2.3	Método passivo	30
3.2.4	Interpretação das termografias	31
3.3	Recomendações práticas de uma inspecção	31
3.3.1	Guia prático de utilização	32
3.3.2	Exemplos práticos de aplicação	33
4	Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes	37
4.1	Introdução	37
4.1.1	Composição da tinta	37
4.2	Condições laboratoriais	39
4.2.1	Reflectância	39
4.2.2	Termografia de infravermelhos	49

4.3	Condições reais	62
4.3.1	Células experimentais	63
4.3.2	Reflectância total	65
4.3.3	Termografia de infravermelhos	67
5	Apresentação e análise de resultados	71
5.1	Introdução	71
5.2	Condições laboratoriais	71
5.2.1	Reflectância total	71
5.2.2	Reflectância direccional	81
5.2.3	Termografia de infravermelhos	90
5.2.4	Síntese dos resultados	108
5.3	Condições reais	109
5.3.1	Reflectância total	109
5.3.2	Termografia de infravermelhos	120
5.3.3	Síntese dos resultados	153
6	Conclusões	155
6.1	Considerações finais	155
6.1.1	Tinta reflectante	155
6.1.2	Método termográfico	156
6.2	Sugestões para desenvolvimentos futuros	157
	Bibliografia	159
A	Resultados individuais obtidos <i>in situ</i> por Termografia	i
A.1	Temperatura superficial medida por termografia e por termopares	i

Índice de Figuras

1.1	Metodologia adoptada no estudo	3
2.1	Princípios básicos de revestimentos e tintas reflectantes	8
2.2	Espectro electromagnético	10
2.3	Distribuições espectrais de referência da irradiância espectral solar terrestre	12
2.4	Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro	14
2.5	Absorção, reflexão, emissão e transmissão da radiação que incide numa superfície.	16
2.6	Lei da reflexão	21
2.7	Reflexão especular	21
2.8	Reflexão difusa	21
2.9	Reflexão dispersa	21
3.1	Configuração básica de uma câmara termográfica	26
3.2	Transmissão de energia electromagnética pela atmosfera	28
3.3	Métodos activos de Termografia de infravermelhos	30
3.4	Placa de aquecimento	30
3.5	Termografia de zona com infiltração de ar entre o tecto e a janela	34
3.6	Termografia de zona com exfiltração de ar (zona vermelha) na cobertura de um piscina	34
3.7	Termografia (pelo interior) de zona com falta de isolamento térmico na parede	34
3.8	Termografia (pelo exterior) de parede com falta de isolamento térmico	35
3.9	Termografia de zona do pavimento humedecida	35
3.10	Termografia (esq.) e imagem real (dir.), de parede de alvenaria humedecida	36
3.11	Termografia de ponte térmica num piso	36
3.12	Termografia (esq.) de ponte térmica (pilar) e correspondente imagem real (dir.)	36
4.1	Esquema de ensaios para a obtenção da reflectância	39
4.2	Espectrofotómetro <i>Hitachi U3300</i> com esfera integradora	40
4.3	Provetes do tipo ETICS antes de aplicado o sistema de pintura	41
4.4	Provetes metálicos antes de aplicado o primário e o sistema de pintura	41
4.5	Pormenor dos provetes rugosos ensaiados	42
4.6	Pormenor da armadilha de luz	44
4.7	Esfera integradora <i>LMT RT500</i>	45
4.8	Demonstração esquemática dos componentes	45
4.9	Medição da reflectância total	46
4.10	Equipamentos utilizados no ensaio de reflectância direcciona	46
4.11	Esquema do procedimento de ensaio para o ângulo de 45°	47
4.12	Esquema de ensaio para a obtenção da reflectância direcciona	48

4.13	Superfície padrão para determinação da reflectância dos provetes ensaiados	49
4.14	Esquema dos ensaios realizados por análise termográfica em laboratório	50
4.15	Emissômetro <i>Model AE1</i> e dispositivo de leitura <i>Model RD1</i>	51
4.16	Câmara termográfica <i>ThermaCam P640</i>	52
4.17	Proвете BrN com fita de emitância conhecida (esq.) e respectivo termograma (dir.)	53
4.18	Termografias do provete BrN com diferentes emitâncias	54
4.19	Diferença entre dois termogramas apenas alterando o intervalo de temperatura	55
4.20	Placa de aquecimento	56
4.21	Termo-higrométo <i>Rotronic Hidrolog</i>	57
4.22	Cores e textura dos provetes ensaiados	57
4.23	Método de aquecimento por condução	58
4.24	Proвете duo-cor	59
4.25	Método de aquecimento por radiação infravermelha	61
4.26	Método de aquecimento por radiação solar	62
4.27	Células experimentais pintadas com as três tintas reflectantes	63
4.28	Representação computadorizada da localização da célula experimental C5 no <i>campus</i> do LNEC	63
4.29	Pormenor construtivo e corte da célula experimental	64
4.30	Localização dos termopares na parede Sul e Oeste da célula experimental C5 (entre o isolamento térmico e revestimento)	65
4.31	Conjunto sensor de irradiância e mostrador digital	65
4.32	Pormenor dos três quadrados pintados com tinta convencional na Parede Oeste	66
4.33	Equipamento utilizado nas medições de reflectância total no exterior	66
4.34	Espectro de resposta do piranómetro e distribuição de energia do espectro solar	67
4.35	Condições meteorológicas no dia de ensaio	67
4.36	Câmara termográfica <i>ThermaCam P640</i> e tripé com nível	68
4.37	Esquema para obtenção da temperatura superficial das paredes da célula experimental C5	68
4.38	Paredes da célula experimental C5 avaliadas (Oeste e Sul)	68
4.39	Esquema representativo do procedimento adoptado para obtenção de termografias nas paredes Oeste e Sul	70
5.1	Curvas espectrais de reflectância para provetes tipo 1	72
5.2	Curvas espectrais de reflectância para provetes de cor telha e cinza do tipo 1	73
5.3	Curvas espectrais de reflectância para provetes de cores extremas do tipo 1	74
5.4	Curvas espectrais de reflectância para cores reflectantes - dados FEUP	76
5.5	Curvas espectrais de reflectância para provetes de cor branca lisos e rugosos	78
5.6	Comparação da reflectância total para provetes BrN e BrT	80
5.7	Comparação da reflectância total para diferentes cores	80
5.8	Valores de reflectância para provetes rugosos	82
5.9	Valores de reflectância para provetes rugosos de cor branca e preta	83
5.10	Iluminância em função do co-seno do ângulo de incidência	84
5.11	Valores de luminância para medições (0°/X°)	85
5.12	Valores de luminância para medições (X°/0°)	85
5.13	Variação do ângulo fonte luminosa - observador	86
5.14	Reflectância de uma superfície lisa e rugosa	87
5.15	Evolução da reflectância em função do ângulo e cor para provetes rugosos	88
5.16	Evolução da reflectância em função do ângulo e cor para provetes lisos	89

5.17	Reflectância em função do tipo de tinta de provetes rugosos (tipo 1)	90
5.18	Termografia do provete BrT aos 0 minutos de arrefecimento	92
5.19	Termografia do provete BrT aos 15 minutos de arrefecimento	93
5.20	Evolução da temperatura superficial após aquecimento por condução	93
5.21	Variação da emitância com a temperatura de alguns não-metals	96
5.22	Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real	97
5.23	Evolução do padrão de temperatura durante o período de arrefecimento	98
5.24	Evolução da temperatura superficial durante o período de arrefecimento após condução - Provete duo-cor	98
5.25	Termografia aos 0 minutos de arrefecimento - provete BrT	99
5.26	Termografia aos 15 minutos de arrefecimento - provete BrT	99
5.27	Termografia aos 0 minutos de arrefecimento - provete BrN	100
5.28	Termografia aos 15 minutos de arrefecimento - provete BrN	100
5.29	Variação da temperatura superficial - aquecimento por condução	101
5.30	Variação da temperatura superficial - aquecimento por radiação infravermelha	101
5.31	Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real	103
5.32	Evolução da temperatura superficial durante o período de arrefecimento após radiação infravermelha - Provete duo-cor	104
5.33	Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real	104
5.34	Evolução da temperatura superficial do provete duo-cor após insolação	107
5.35	Evolução da temperatura superficial para a cor preta após insolação e após radiação infravermelha	107
5.36	Arrefecimento do provete duo-cor após insolação	108
5.37	Piranómetro utilizado na campanha <i>in situ</i>	109
5.38	Representação da radiação incidente e reflectida na célula experimental C5	110
5.39	Evolução da radiação global e temperatura ambiente no dia do ensaio	111
5.40	Variação da reflectância total para a cor branco reflectante (BrT)	112
5.41	Variação da reflectância total para a cor preto reflectante (PrT)	112
5.42	Parede Oeste às 13h30	113
5.43	Parede Oeste às 16h30	114
5.44	Protecção da área a ser analisada	114
5.45	Variação da intensidade da radiação solar em função da orientação e estação do ano	115
5.46	Variação da intensidade da radiação incidente em função da orientação da parede	116
5.47	Localização dos quadrados pintados com tintas convencionais na parede Oeste	117
5.48	Evolução da reflectância total das diferentes tintas ao longo do período ensaiado, na parede Oeste	117
5.49	Provete duo-cor a envelhecer naturalmente	119
5.50	Inspecções termográficas efectuadas	121
5.51	Condições meteorológicas às 11h - 1ª inspecção	122
5.52	Comparação de quatro termogramas da parede Oeste, em quatro períodos do dia diferentes	124
5.53	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 11h	126
5.54	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 11h	126
5.55	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 13h	126
5.56	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 13h	127
5.57	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 18h30	127
5.58	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30	127
5.59	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 20h30	128

5.60	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30	128
5.61	Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Oeste	129
5.62	Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Oeste	129
5.63	Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Oeste	130
5.64	Condições meteorológicas às 11h - 2ª inspecção	131
5.65	Variação da temperatura superficial nas paredes Sul e Oeste, para a cor PrT	131
5.66	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 11h - 2ª inspecção	132
5.67	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 11h - 2ª inspecção	132
5.68	Imagens reais da parede Oeste às 11h - 1ª (esq.) e 2ª inspecção (dir.)	133
5.69	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 13h - 2ª inspecção	133
5.70	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 13h - 2ª inspecção	133
5.71	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 18h30 - 2ª inspecção	134
5.72	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 18h30 - 2ª inspecção	134
5.73	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 20h30 - 2ª inspecção	135
5.74	Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 20h30 - 2ª inspecção	135
5.75	Evolução da T_{amb} e Rad_{global} na semana 15/08/2013 a 21/08/2013	136
5.76	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 11h .	137
5.77	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 11h . .	138
5.78	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 13h .	138
5.79	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 13h . .	139
5.80	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30	139
5.81	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 18h30 .	140
5.82	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30	140
5.83	Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 20h30 .	141
5.84	Pormenor da viga de fundação em betão da célula experimental C5	142
5.85	Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Sul e Oeste	142
5.86	Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Sul e Oeste	143
5.87	Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Sul e Oeste	143
5.88	Condições meteorológicas às 11h - 3ª inspecção	144
5.89	Diferença de temperatura superficial obtida por Termografia e termopares, para a cor BrT da parede Sul, nas três inspecções termográficas	145
5.90	Termografia geral (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 19h30 - 3ª inspecção . .	146
5.91	Termografia geral em escala cromática cinza da parede Oeste às 19h30 - 3ª inspecção . .	146
5.92	Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 18h30	147
5.93	Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30	148
5.94	Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 19h30	149
5.95	Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 19h30	149
5.96	Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 20h30	150
5.97	Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30	150
5.98	Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Sul e Oeste	151
5.99	Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Sul e Oeste	152
5.100	Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Sul e Oeste	152

Índice de Quadros

2.1	Valores particulares das propriedades radiantes de superfícies	18
4.1	Provetes de superfície rugosa (tipo 1)	42
4.2	Provetes de superfície lisa (tipo 2)	43
4.3	Provetes de superfície lisa ensaiados	52
4.4	Comparação dos valores de temperatura obtidos na câmara termográfica e software . . .	55
4.5	Provetes do tipo ETICS ensaiados	57
5.1	Reflectância total dos provetes do tipo 1 no Visível	75
5.2	Reflectância total dos provetes do tipo 1 no Visível - Infravermelho próximo	75
5.3	Reflectância total Visível e Solar (TSR) - dados FEUP	77
5.4	Reflectância total dos provetes BrN1b, BrN2, BrT1b e BrT2	78
5.5	Valores de reflectância total dos provetes rugosos	79
5.6	Valores de reflectância total dos provetes lisos	79
5.7	Comparação da reflectância total para diferentes tipos de tinta da mesma cor	81
5.8	Valores de reflectância para medições ($0^\circ/X^\circ$)	83
5.9	Valores de reflectância para medições ($X^\circ/0^\circ$)	83
5.10	Valores de luminância para medições ($0^\circ/X^\circ$)	84
5.11	Valores de luminância para medições ($X^\circ/0^\circ$)	85
5.12	Valores de emitância (ϵ) para os provetes ensaiados	91
5.13	Valores de temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após condução .	92
5.14	Valores de temperatura superficial da fita e emitância corrigida dos provetes	94
5.15	Variação da emitância ao longo do período de arrefecimento	95
5.16	Comparação da emitância obtida pelo método das fitas e emissómetro portátil	95
5.17	Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após condução - Proвете duo-cor	97
5.18	Temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após radiação infravermelha	100
5.19	Comprimentos de onda na gama de temperatura do ensaio pela Lei de Wien	101
5.20	Variação da emitância no período de arrefecimento	102
5.21	Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após radiação infravermelha - Proвете duo-cor	103
5.22	Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após insolação - Proвете duo-cor	105
5.23	Diferença de temperatura superficial entre a cor preta e branca aos 0 minutos de arrefecimento após insolação	106
5.24	Condições gerais de ensaio	110

5.25	Reflectância total (R_{total}) e correspondente radiação incidente (Rad_{incid}) nas diferentes orientações e campanhas	111
5.26	Reflectância total das cores preto reflectante (PrT) e branco reflectante (BrT) na parede Sul	113
5.27	Radiação incidente nas três orientações para as três campanhas	115
5.28	Valores de reflectância obtidos com sombreamento reduzido	118
5.29	Valores de reflectância do provete envelhecido (duo-cor) e dos provetes individuais correspondentes	120
5.30	Diferença de reflectância entre o provete duo-cor envelhecido e provetes individuais correspondentes	120
5.31	Temperatura superficial na parede Sul da célula experimental C5 obtida por termografia e termopares	122
5.32	Temperatura superficial na parede Oeste da célula experimental C5 obtida por termografia e termopares	122
5.33	Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - Dia 11/07/2013 . .	125
5.34	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste	129
5.35	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes nas paredes Sul e Oeste	130
5.36	Gama de temperaturas de medição (δT) definidas consoante o período do dia e orientação	132
5.37	Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - Dia 16/08/2013 . .	136
5.38	Influência do factor sombra na temperatura superficial da 1ª e 2ª inspecções, para a cor preta	137
5.39	Comparação dos factores climáticos e temperatura superficial da 1ª e 2ª inspecções, para o PrT	138
5.40	Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h e 13h, para a cor preta	139
5.41	Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h, 13h e 18h30, para a cor preta	140
5.42	Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h, 13h, 18h30 e 20h30, para a cor preta	141
5.43	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste	143
5.44	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes na parede Sul e Oeste	144
5.45	Diferença de temperatura entre termopares e termografia para a parede Oeste na 3ª inspecção	145
5.46	Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - 3ª inspecção	147
5.47	Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 18h30, para a cor branca	148
5.48	Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 18h30, para a cor preta	148
5.49	Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 20h30, para a cor branca	150
5.50	Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 20h30, para a cor preta	151
5.51	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste	152
5.52	Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes na parede Sul e Oeste	153
5.53	Síntese da diferença de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais para as três inspecções, na parede Oeste	154

Simbologia

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
ANPC	Autoridade Nacional de Protecção Civil
CIN	Corporação Industrial do Norte
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
EPS	Poliestireno Expandido Moldado
ETICS	External Thermal Insulation Composite System
ETR	Extraterrestrial Radiation
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NCCt	Núcleo de Comportamento das Construções
NIR	Região do espectro electromagnético correspondente ao infravermelho próximo
NRI	Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
NIST	National Institute of Standards and Technology
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
RECS	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
UV	Região do espectro electromagnético correspondente aos ultravioletas
VIS	Região do espectro electromagnético correspondente ao visível

Grandezas

c	velocidade da luz (no vácuo) = $2.998 \cdot 10^8$, [$m \cdot s^{-1}$]
E	energia por quanto de radiação
$E_{\lambda T}$	distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro, [$W \cdot m^{-2} \cdot (\mu m^{-1})$]
E	poder emissivo, [$W \cdot m^{-2}$]
E^0	poder emissivo do corpo negro, [$W \cdot m^{-2}$]
E_{λ}	poder emissivo espectral, [$W \cdot m^{-2}$]
E_{λ}^0	poder emissivo espectral do corpo negro, [$W \cdot m^{-2}$]
G	irradiação, [$W \cdot m^{-2}$]
f	frequência, [Hz]
h	constante de Planck = $6.63 \cdot 10^{-34}$, [$J \cdot s$]
h_c	condutância térmica superficial por convecção, [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C$]
h_r	condutância térmica superficial por radiação, [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C$]
h_i	condutância térmica superficial interior, [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C$]
h_e	condutância térmica superficial exterior, [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C$]
J	radiosidade, [$W \cdot m^{-2}$]
K	constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23}$, [$J \cdot K^{-1}$]
L	luminância, [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
L_{λ}	luminância espectral, [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
L_{λ}^0	luminância espectral do corpo negro, [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$]
Nic	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento, [$kWh/m^2 \cdot ano$]
Nvc	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, [$kWh/m^2 \cdot ano$]
Ntc	Necessidades nominais anuais de energia primária, [$kWh/m^2 \cdot ano$]
q	fluxo de calor, [$W \cdot m^{-2}$]
R	resistência térmica, [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]
T	temperatura termodinâmica [Kelvin]
T_i	temperatura interior, [$^\circ C$]
T_e	temperatura exterior, [$^\circ C$]
T_{si}	temperatura superficial interior, [$^\circ C$]

T_{se}	temperatura superficial exterior, [$^{\circ}C$]
U	coeficiente de transmissão térmica, [$W/m^2 \cdot ^{\circ}C$]
λ	comprimento de onda [μm]
λ	comprimento de onda [nm]
σ	constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$, [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
ρ_{λ}	reflectância espectral, [-]
ρ_{θ}	reflectância direccional, [-]
α_{λ}	absortância espectral, [-]
τ_{λ}	transmitância espectral, [-]
ε	emitância hemisférica total, [-]
ε_{λ}	emitância hemisférica espectral, [-]
ε_{θ}	emitância direccional total, [-]
$\varepsilon_{\lambda\theta}$	emitância direccional espectral, [-]

Ensaio e Determinações

D_{obj}	distância do objecto, [m]
HR	humidade relativa, [%]
I	iluminância para $\theta = 0^{\circ}$, [$lumen/m^2$]
I_{θ}	iluminância para um determinado ângulo θ , [$lumen/m^2$]
L	luminância, [cd/m^2]
Rad_{incid}	radiação incidente, [$W \cdot m^{-2}$]
Rad_{global}	radiação global (medida na horizontal), [$W \cdot m^{-2}$]
R_{total}	reflectância total, [%]
R_{θ}	reflectância direccional, [%]
T_{refl}	temperatura aparente reflectida, [$^{\circ}C$]
T_{atm}	temperatura atmosférica, [$^{\circ}C$]
TSR	reflectância solar total, [%]
ΔT	diferença de temperatura, [$^{\circ}C$]

δT	gama de temperatura configurada na câmara termográfica, [°C]
$\rho(\lambda)$	reflectância espectral, [%]
ρ_{total}	reflectância total, [%]
ε	emitância do objecto, [-]

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

A constante mudança climática global, associada ao fenómeno designado por *heat island effect*, é referenciado na bibliografia como um agente importante no incremento da temperatura ambiente, assim como, no aumento da duração e frequência de ondas de calor que anualmente assolam os centros urbanos.

De acordo com SANTAMOURIS *et al.* (2011) o *heat island effect* está relacionado com as temperaturas mais elevadas que se verificam em centros urbanos, quando comparadas com as áreas rurais ou suburbanas vizinhas. Segundo OKE *et al.* (1991) o fenómeno está relacionado, principalmente, com a grande densidade de edifícios e estruturas urbanas que absorvem radiação solar, o uso de materiais de construção muito absorventes, a falta de espaços verdes, o planeamento urbano implementado e a produção de calor antropogénica.

Segundo SANTAMOURIS *et al.* (2011), a aplicação em larga escala de superfícies com maior reflectância solar pode afectar o microclima urbano, ao permitir a diminuição da temperatura do ar, devido a uma menor transferência de calor da superfície para o ar ambiente, reduzindo desta forma o *heat island effect*. Estudos efectuados sobre a aplicação de materiais reflectantes em coberturas, apontam para uma redução da temperatura do ar durante o dia, em média, entre 1°C a 3°C para várias cidades dos Estados Unidos da América.

É por isso perceptível que os materiais utilizados na construção civil desempenham um papel importante no equilíbrio térmico do ambiente urbano. Estes materiais, como as telhas, membranas, revestimentos de fachadas ou tintas, absorvem a radiação solar e dissipam parte do calor acumulado através de processos convectivos e radiativos para a atmosfera, aumentando desta forma, a temperatura ambiente. Assim, as características técnicas e propriedades térmicas dos materiais que constituem os elementos construtivos, determinam também o consumo de energia e as condições de conforto térmico dos ocupantes do edifício.

Surge então a necessidade de utilizar materiais ou revestimentos, que permitam de uma forma económica e ecológica, resolver os problemas anteriormente referidos. A solução apresentada neste estudo recorre à utilização de materiais, designados como *cool materials*, que apresentam elevadas reflectância solar e emitância, contribuindo desta forma para a redução dos ganhos térmicos convectivos e radiativos em ambiente urbano e para a mitigação do *heat island effect*.

Estes materiais reflectantes ou *cool* podem apresentar-se sobre várias formas de produtos, consoante a sua aplicação [ZINZI & FASANO, 2009]:

- revestimentos e tintas;
- membranas;
- telhas.

A família de produtos que apresenta a melhor relação custo-benefício é a dos revestimentos e tintas reflectantes. Os vários artigos consultados, e constantes da bibliografia, revelam também que a utilização deste tipo de solução conduz a benefícios para os utilizadores, designadamente, um maior conforto térmico interior, principalmente em edifícios sem ar-condicionado e uma redução dos custos de exploração associados aos consumos energéticos para arrefecimento das habitações, em edifícios condicionados.

1.2 Objectivos e metodologia

A maioria dos estudos publicados são orientados para a aplicação de revestimentos reflectantes em coberturas, actuando numa zona do edifício com elevada área exposta ao exterior, prolongada exposição solar e elevados ganhos térmicos. Tendo em conta que os ganhos térmicos de um edifício não se processam apenas pela cobertura, optou-se por avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes actualmente comercializadas no mercado nacional, quando aplicadas em fachadas, averiguando a variação da temperatura superficial na fachada por Termografia de infravermelhos.

Face ao exposto, esta dissertação tem como objectivo geral avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes quando aplicadas em fachadas de edifícios, com o intuito de averiguar a sua viabilidade como solução de redução dos ganhos térmicos em situação de Verão e de melhoramento do comportamento térmico e energético do edifício. Para além da avaliação do comportamento térmico de tintas reflectantes, também tem como objectivo, analisar a viabilidade da Termografia de infravermelhos, como método de diagnóstico e de quantificação do desempenho térmico de tintas reflectantes, traduzido pela temperatura superficial exibida.

Muitas das anomalias que se verificam em edifícios devem-se a solicitações de origem térmica, pelo que a quantificação da temperatura será um importante apoio na compreensão dos fenómenos que estão na origem das anomalias. A utilização deste método de análise não destrutiva permite, sem alterar ou danificar o objecto analisado, determinar a distribuição de temperaturas da superfície. Este facto revela ser muito importante pois trata-se de um factor determinante para o desempenho térmico e consumo de energia dos edifícios.

O conhecimento do padrão de temperaturas superficiais possibilita a exploração de outra vertente do diagnóstico termográfico como, a detecção de variações de temperatura prejudiciais à durabilidade dos materiais e que permitem a sua degradação. Neste contexto, pretende-se avaliar se a Termografia de infravermelhos possibilita um diagnóstico fiável e quantificável da distribuição de temperaturas superficiais da fachada de um edifício, em condições reais de exposição, e desta forma, avaliar o desempenho térmico das tintas reflectantes.

Em termos da metodologia adoptada, foi necessário, em primeiro lugar, caracterizar as tintas reflectantes relativamente às suas propriedades radiativas. Esta caracterização foi efectuada em condições controladas de laboratório, avaliando-se a influência da cor, rugosidade, radiação incidente (faixa espectral e ângulo) na reflectância dos provetes pintados, com tinta reflectante e convencional.

Para a determinação da emitância recorreu-se a dois métodos diferentes, avaliando-se igualmente para provetes pintados com tinta reflectante e convencional. A reflectância foi determinada utilizando-se três ensaios, um deles *in situ* e os outros dois em laboratório.

É igualmente avaliado o desempenho térmico por análise termográfica dos provetes em laboratório e *in situ*. Em laboratório procedeu-se a dois tipos de aquecimento: por condução e por radiação. Em condições reais de exposição, o aquecimento é efectuado utilizando-se o Sol. Os provetes utilizados nos ensaios foram concebidos com o objectivo de simular superfícies reais das envolventes dos edifícios, neste caso, as fachadas da célula experimental analisada com revestimento do tipo ETICS e uma superfície lisa (metálica).

O esquema da figura 1.1 resume a metodologia seguida para a determinação do desempenho térmico de tintas reflectantes aplicadas em fachadas. São apresentadas as principais propriedades quantificadas nos ensaios *in situ* e em laboratório, assim como, a relação que pode ser estabelecida entre ensaios.

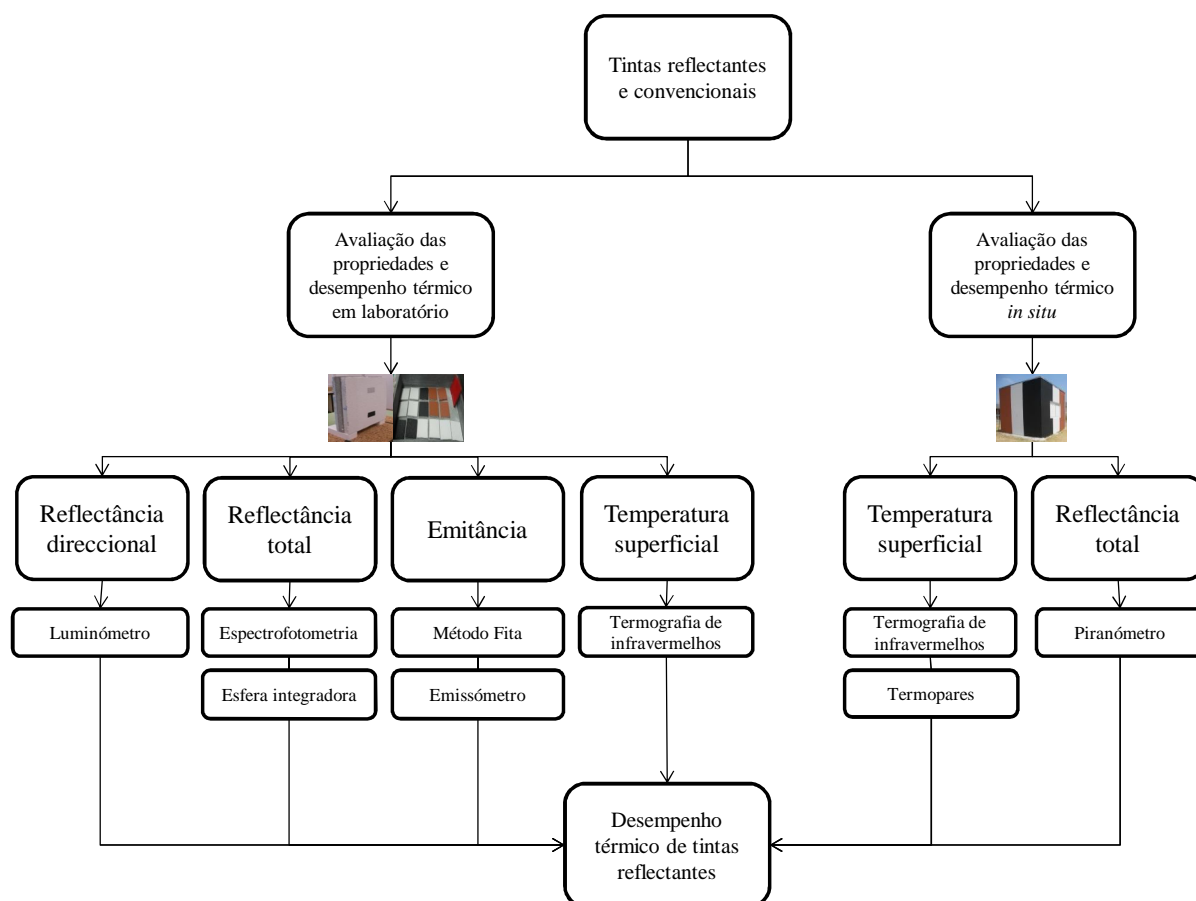


Fig. 1.1: Metodologia adoptada no estudo

Os resultados obtidos nas várias campanhas experimentais, permitiram avaliar os parâmetros e propriedades que mais influenciam o comportamento das tintas reflectantes e avaliar o desempenho térmico em condições controladas de laboratório e *in situ*. Efectuada a caracterização em laboratório, pretendeu-se analisar o seu desempenho térmico quando aplicadas numa situação real (célula experimental C5), sujeita a condições naturais de exposição. Nesta situação, são acrescentados outros

factores à temperatura do ar, como a radiação solar e o vento. A acção individual, ou conjunta, destes factores terá um efeito perturbador no desempenho térmico de tintas reflectantes e na utilização do método termográfico, sendo avaliada a preponderância de cada um.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação que se apresenta está organizada em seis capítulos, sendo o presente o capítulo introdutório, onde é feito um breve enquadramento ao tema, descritos os principais objectivos do trabalho e a contribuição do mesmo, assim como, a sua organização.

O segundo capítulo é sobretudo teórico, baseado na pesquisa bibliográfica dos conceitos que suportam a compreensão dos temas abordados no presente estudo, nomeadamente, os conceitos gerais e propriedades que influenciam o desempenho térmico de tintas reflectantes. Ao longo da dissertação são efectuadas comparações com outros estudos semelhantes, de forma a interpretar os resultados e conclusões obtidas.

No capítulo três é introduzido o tema da Termografia de infravermelhos, abordando os princípios de funcionamento dos equipamentos termográficos, a análise termográfica e apresentando recomendações práticas para uma inspecção termográfica adequada.

Segue-se o capítulo quatro, onde é descrito o desenvolvimento experimental, identificados os materiais e técnicas utilizadas, tanto em laboratório como *in situ*, assim como, os procedimentos de ensaio adoptados para a caracterização das tintas reflectantes.

No quinto capítulo, procede-se à apresentação e à análise dos resultados obtidos nas campanhas experimentais. É efectuada a análise dos resultados, relacionam-se as principais propriedades das tintas estudadas e avalia-se o desempenho térmico de tintas reflectantes.

Finalmente, no sexto capítulo é apresentada uma síntese das conclusões retiradas na sequência do desenvolvimento do trabalho e são apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros, nesta área em estudo.

As referências bibliográficas e anexo são apresentados no fim da presente dissertação, em capítulos independentes.

Capítulo 2

Desempenho térmico de tintas reflectantes

2.1 Introdução

A definição de requisitos da qualidade térmica e eficiência energética, assim como, a avaliação do desempenho energético dos edifícios de habitação baseia-se no comportamento térmico e a eficiência dos sistemas, aos quais acrescem, no caso dos edifícios de comércio e serviços, a instalação, a condução e a manutenção de sistemas técnicos. Em Portugal, existem actualmente dois regulamentos que estabelecem os requisitos térmicos para edifícios: o REH ou Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação que incide exclusivamente sobre os edifícios de habitação e o RECS ou Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços que recai sobre os de comércio e serviços [DL, 2013].

No âmbito do trabalho desenvolvido interessa analisar o comportamento da envolvente. O REH estabelece os requisitos para os edifícios de habitação, novos ou sujeitos a intervenções, bem como os parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético, em condições nominais, de todos os edifícios de habitação e dos seus sistemas técnicos. A caracterização do comportamento térmico dos edifícios faz-se, através da quantificação de um certo número de índices e de parâmetros.

A avaliação do comportamento térmico e sua melhoria incide sobre as características da envolvente opaca e envidraçada, ventilação e necessidades nominais anuais de energia para aquecimento e arrefecimento. São por isso quantificados vários índices térmicos como os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento (N_{ic}), das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}) e das necessidades nominais anuais de energia primária (N_{tc}). Estes são complementados por outros parâmetros específicos como: os coeficientes de transmissão térmica dos elementos da envolvente opaca; o factor solar dos vãos envidraçados e a taxa de renovação de ar [DL, 2013].

2.2 Comportamento térmico de edifícios

É perceptível que a avaliação do comportamento térmico de um edifício é um problema complexo, tendo em conta a multiplicidade de situações e parâmetros que caracterizam os edifícios. Existem por isso inúmeros factores que condicionam o desempenho térmico e energético de uma edificação, possibilitando ganhos e perdas térmicas que se traduzem num maior ou menor conforto dos ocupantes.

Relativamente à transferência de calor, as variáveis climáticas que mais influenciam o desempenho térmico dos edifícios, são a temperatura do ar exterior e a radiação solar

[GONÇALVES & GRAÇA, 2004]. A diferença de temperatura entre o interior e exterior do edifício, determina o estabelecimento do fluxo de calor do interior para o exterior, que ocorre fundamentalmente no período de Inverno, tratando-se neste caso de perdas térmicas. No período de Verão o sentido do fluxo tem tendência a inverter-se e estar-se-á numa situação de ganhos térmicos. A existência de ganhos térmicos por troca de calor contribui para aumentar a carga térmica do edifício e consequentemente a sua temperatura interna.

Em período de Inverno, as perdas térmicas constituem a principal razão para a diminuição da temperatura interior num edifício. Consoante o caso verificado, são adoptadas medidas no sentido de melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios. Por exemplo, em situação de Inverno, a minimização das perdas constitui uma das medidas mais eficazes no sentido de melhorar as condições de conforto no interior dos edifícios, e as medidas normalmente adoptadas resultam na utilização de soluções de isolamento térmico nos elementos opacos (paredes, cobertura e pavimentos) e/ou a utilização de vidros duplos nos vãos envidraçados [GONÇALVES & GRAÇA, 2004].

A radiação solar é uma das variáveis climáticas de importância fundamental no desempenho térmico de edifícios, e consequentemente, no estabelecimento de condições de conforto térmico dos seus ocupantes. No Inverno consiste numa fonte de calor muito importante, contribuindo positivamente para o aumento da temperatura interior, contrariamente ao Verão em que constitui uma fonte de calor indesejável.

2.2.1 Trocas de calor edifício-envolvente

A condição fundamental para que ocorram transferências de calor é a existência de diferenças de temperatura entre duas zonas, sendo que o fluxo de calor processa-se da zona com temperatura mais elevada para a mais baixa.

A transferência de calor num meio ou entre corpos pode ocorrer de três formas [MADALGUE, 2001a]:

- **Condução** - Fenómeno de propagação de calor, sempre que existe uma diferença de temperatura entre dois corpos sólidos ou fluidos em contacto ou entre partes de um corpo.
- **Convecção** - Fenómeno semelhante à condução mas que envolve a variação da massa de um gás ou fluido por acção da temperatura. A variação da temperatura das moléculas implica a alteração relativa do seu posicionamento.
- **Radiação** - É um processo de transferência de calor comum a toda a matéria com temperatura superior ao zero absoluto (0 K). A energia radiada é transportada em longas distância através de gases e vácuo, sem necessitar de um meio de propagação, como a condução e convecção.

O processo de transmissão de calor entre o ambiente interior do edifício e o exterior podem ser resumidas e simplificadas, considerando a transmissão de calor unidireccional em regime permanente, nas três situações apresentadas:

- **Trocas de calor entre o ambiente interior e o elemento construtivo** - Resultantes da convecção entre o ar e o elemento e da radiação proveniente dos restantes elementos no local.

O fluxo de calor (q) entre o ambiente e o elemento, em resultado das transferências de calor por convecção e radiação, é dado por:

$$q = h_i \cdot (T_i - T_{si}) \quad (2.1)$$

Nesta equação h_i é a condutância térmica superficial interior, T_i a temperatura interior, e T_{si} a temperatura superficial interior. A condutância térmica superficial interior corresponde à soma da condutância térmica superficial por convecção (h_c) e radiação (h_r).

- Trocas de calor no interior do elemento construtivo por condução.

O fluxo de calor (q) em resultado das transferências de calor por condução é dado por:

$$q = \frac{(T_{si} - T_{se})}{R} \quad (2.2)$$

Nesta equação, R é o somatório das resistências térmicas das várias camadas que constituem o elemento, T_{si} a temperatura superficial interior e T_{se} a temperatura superficial exterior.

- Trocas de calor entre o elemento construtivo e o ambiente exterior - Resultantes da convecção entre o ar e o elemento e da radiação proveniente dos restantes elementos no local.

O fluxo de calor (q) entre o elemento e o ambiente exterior em resultado das transferências de calor por convecção e radiação é dado por:

$$q = h_e \cdot (T_e - T_{se}) \quad (2.3)$$

Nesta equação, h_e é a condutância térmica superficial exterior, T_e a temperatura exterior e T_{se} a temperatura superficial exterior. A condutância térmica superficial exterior corresponde à soma da condutância térmica superficial por convecção (h_c) e radiação (h_r).

O comportamento térmico de um elemento é caracterizado pelo coeficiente de transmissão térmica (U), expresso em $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$. Este pode ser obtido a partir da seguinte expressão:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + R + \frac{1}{h_e} \quad (2.4)$$

A transmissão de calor por condução, quer sejam as perdas de calor através dos elementos construtivos da envolvente no Inverno, quer os ganhos indesejáveis de calor através dos mesmos elementos no Verão, são fenómenos que muito influenciam o comportamento térmico dos edifícios.

Para minimizar estes efeitos, em ambas as estações, adoptam-se normalmente medidas que visam aumentar a resistência térmica dos elementos construtivos [GONÇALVES & GRAÇA, 2004]:

- No caso da envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos), através da incorporação de materiais isolantes, de que são exemplo a cortiça, o poliestireno expandido moldado ou extrudido, o poliuretano e as lãs minerais.
- No caso da envolvente envidraçada, através da selecção de vãos envidraçados cujo conjunto “vidro/caixilho/persiana” apresente valores de resistência térmica mais elevados, por exemplo, vidros duplos com caixilharia com corte térmico e protecções solares exteriores (palas).

Como alternativa ou complemento desenvolveram-se revestimentos e tintas termoreflectoras ou reflectantes, constituindo uma protecção térmica suplementar. Este tipo de revestimentos permitem reduzir a temperatura superficial do elemento onde são aplicados, diminuindo os ganhos térmicos através deste quando exposto à radiação solar.

A utilização deste tipo de revestimentos reflectantes, muito usual em coberturas e que também pode ser utilizado em fachadas, pode contribuir para a melhoria do desempenho energético e térmico de edifícios, visto apresentarem uma área considerável quando comparada com outro elemento construtivo. A adopção deste tipo de solução pode reduzir a transmissão de calor por condução para o interior da habitação, em período de Verão.

Este facto foi verificado por SHEN *et al* (2010), para o caso de edifícios sem ar-condicionado. Os resultados obtidos indicaram uma redução significativa da temperatura superficial da construção. No Verão, um aumento de reflectância da superfície de 32% para 61% resultou numa redução média da temperatura exterior de 6 °C na parede Oeste, e no Inverno a respectiva redução foi de 8,3 °C na parede Sul. Conclui-se igualmente que a resistência térmica dos materiais tem um impacto significativo sobre o desempenho dos revestimentos reflectantes, apresentando melhores performances quando aplicados em materiais com menor resistência térmica.

2.2.2 Influência da tinta reflectante no comportamento térmico de um edifício

Materiais altamente reflectantes, como as tintas reflectantes (*cool paints*) abordadas neste trabalho, representam uma solução passiva, económica e ecológica que contribui para a eficiência energética em edifícios [SANTAMOURIS *et al.*, 2011]. A sua aplicação permite baixar o consumo de energia para refrigeração e melhora o microclima urbano através da redução da temperatura superficial e do ar. Este tipo de revestimentos apresentam como principais características:

- Elevada reflectância solar, que mede a capacidade da superfície para reflectir a radiação solar
- Elevada emitância, que mede a capacidade da superfície libertar o calor absorvido.

Assim sendo, estas duas propriedades influenciam a temperatura atingida pela superfície. O esquema da figura 2.1 apresenta o efeito que a aplicação de tintas reflectantes em edifícios têm no seu comportamento térmico.

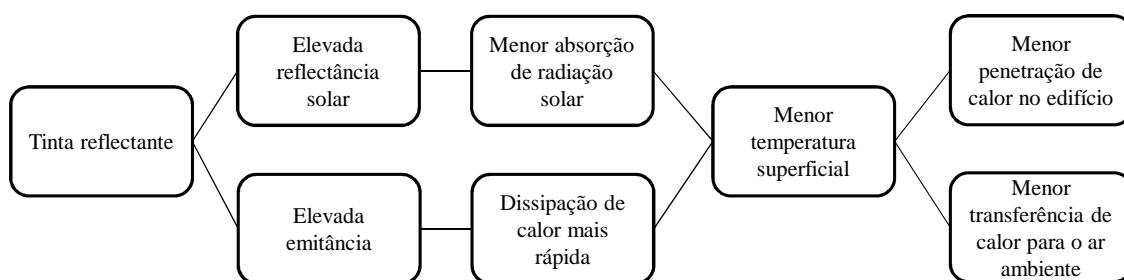


Fig. 2.1: Princípios básicos de revestimentos e tintas reflectantes adaptado de [SANTAMOURIS *et al.*, 2011]

Segundo SANTAMOURIS *et al.* (2011) durante o dia o factor dominante para o desempenho térmico da superfície é a reflectância solar enquanto a emitância é menos influente na temperatura superficial neste período. Durante o período nocturno, a situação inverte-se, estabelecendo-se uma relação directa

entre a emitância e a temperatura superficial atingida, passando a ser o principal factor influenciador da performance térmica da superfície.

O impacto que o tipo e a cor da tinta utilizados têm no comportamento térmico de um edifício depende de vários parâmetros, como a composição da parede, orientação do edifício, posicionamento de vãos envidraçados e ventilação. O estudo efectuado por V. CHENG *et al.* (2005) em células experimentais de diferentes cores, demonstra que a influência da cor depende da radiação solar; quanto mais escura a cor, maior a sensibilidade à radiação solar. Este facto significa que uma superfície mais escura apresenta uma absorptância mais elevada, absorvendo a maior parte da radiação solar que incide. O calor absorvido é transferido para a superfície interna da parede por condução, aquecendo posteriormente o ar interior por convecção. O mesmo estudo revelou que as temperaturas no interior da célula experimental com resistência térmica mais elevada, eram menos dependentes da radiação solar. O resultado sugere que o aumento da resistência térmica reduz a sensibilidade da cor da superfície [CHENG *et al.*, 2005].

No estudo realizado por SYNNEFA *et al.* (2007b) verificou-se que revestimentos reflectantes coloridos aplicados em lajetas de betão exibem a mesma reflectância na região do visível que revestimentos coloridos convencionais de cor igual, mas apresentam uma gama de absorção mais selectiva na região infravermelha do espectro, reflectindo grande parte da energia solar que chega como radiação infravermelha, em vez de absorvê-la. Esta característica resulta em temperaturas superficiais mais baixas para todos os revestimentos reflectantes coloridos, independentemente da cor.

Este tipo de revestimentos já não depende apenas da cor para melhorar o desempenho térmico, combinando as preferências estéticas com o contributo para a eficiência energética. Vários estudos publicados referem exactamente isso, indicando que a poupança na energia de arrefecimento nos períodos de maior consumo varia entre 3% e 35%, dependendo do tipo de isolamento e configuração da cobertura [SANTAMOURIS *et al.*, 2011].

A poupança energética depende de vários parâmetros como as características do edifício, o tipo de utilização e as condições climáticas locais. Esta poupança é mais significativa em edifícios antigos pois apresentam pouco ou nenhum isolamento térmico. Estudos de simulação apoiam estes resultados e permitem o cálculo da economia energética obtida para diversas condições climáticas [SANTAMOURIS *et al.*, 2011].

Uma questão que surge no âmbito da utilização deste tipo de soluções é se o aumento da reflectância solar poderá contribuir para um provável incremento do consumo de energia para aquecimento, em período de Inverno. De acordo com SYNNEFA *et al.* (2007b) o aumento da reflectância solar é muito menos importante do que as correspondentes poupanças no consumo de energia para arrefecimento que se obtêm, para condições de clima quente / moderado (período de Verão). Em período de Inverno a posição do sol é mais baixa e a radiação solar é menos intensa. Neste período o número de horas de exposição solar é mais reduzido e a probabilidade de nebulosidade aumenta, contribuindo directamente para a diminuição do total de energia que atinge a superfície, reduzindo a influência que os revestimentos reflectantes poderão ter no aumento do consumo de energia para aquecimento.

2.2.3 O espectro electromagnético

A radiação perceptível ao olho humano, conhecida como luz visível, representa apenas uma pequena parte do espectro electromagnético. Existe uma extensa gama de radiação que é invisível ao olho humano, sendo o espectro electromagnético dividido em regiões consoante o comprimento de onda (figura 2.2).

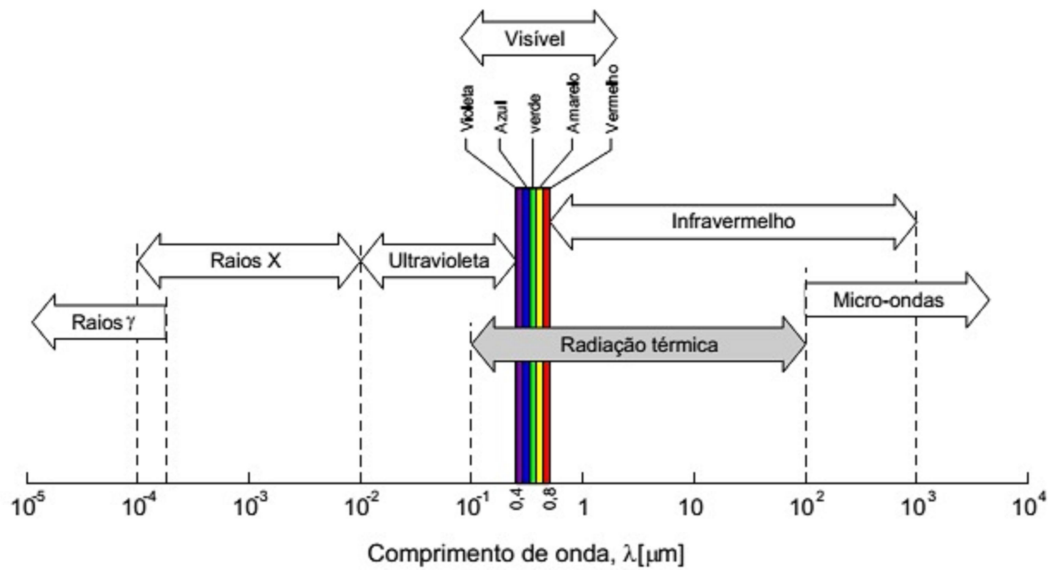


Fig. 2.2: Espectro eletromagnético adaptado de [MATIAS, 2001]

Todos os corpos emitem radiação eletromagnética como resultado da oscilação interna das partículas constituintes da matéria. Estas oscilações variam consoante a temperatura a que se encontra a matéria, conduzindo à emissão de ondas eletromagnéticas com diferentes comprimentos de onda. A radiação eletromagnética não necessita de um suporte físico para se propagar [MODEST, 2003].

Existem duas abordagens possíveis para entender a radiação eletromagnética. A primeira consiste em admitir que se tratam de ondas eletromagnéticas (Teoria da onda eletromagnética) enquanto que a segunda admite que se tratam de parcelas energéticas sem massa ou fótons (Mecânica quântica). Ambas as abordagens são usadas, embora a teoria da onda eletromagnética permita uma melhor compreensão das propriedades radiativas de líquidos ou sólidos. A Mecânica Quântica apresenta melhores resultados na explicação das propriedades radiativas dos gases [MODEST, 2003].

Considerando a emissão de fótons, recorrendo à Teoria Quântica, formulada por Max Planck em 1901, é possível considerar a radiação eletromagnética como um movimento de onda ou corrente de partículas, usualmente apelidados de *quanto* ou fótons [MAAS, 1972]. Esse fenómeno ondulatório pode ser caracterizado por três parâmetros: a velocidade da onda ou velocidade da luz (c), o comprimento de onda (λ) e o número de ciclos por segundo ou frequência (f). Os três parâmetros referidos relacionam-se na seguinte equação:

$$\lambda \cdot f = c \quad (2.5)$$

Nesta equação, f é a frequência em hertz, c a velocidade da luz e λ o comprimento de onda. Observa-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à frequência.

Tendo em conta os mecanismos quânticos obtém-se a seguinte relação:

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6, E é a energia por *quanto* de radiação, h é a constante de Planck, c a velocidade da luz e λ o comprimento de onda.

O espectro electromagnético, representado na figura 2.2, é dividido em bandas específicas, estendendo-se desde dos raios cósmicos e gama até às ondas de rádio incluindo as regiões ultravioleta, visível e infravermelho. O comprimento de onda é geralmente expresso em micrómetros ($1 \mu\text{m} = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$) ou em nanómetros ($1 \text{ nm} = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}$).

2.2.4 Radiação térmica

A radiação térmica constitui uma fracção considerável da radiação electromagnética (figura 2.2) e corresponde à fracção da radiação electromagnética relacionada com a transferência de calor. Este facto revela ser de extrema importância para a compreensão dos temas abordados neste trabalho. Como outras fracções da radiação electromagnética, esta é caracterizada por vários parâmetros, como comprimento de onda e frequência.

A radiação térmica é constituída por uma pequena parte de radiação ultravioleta ($0,1 \mu\text{m} < \lambda < 0,4 \mu\text{m}$), pela radiação visível ($0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$) e por uma grande parte da radiação infravermelha ($0,78 \mu\text{m} < \lambda < 10^2 \mu\text{m}$). Tal como foi referido anteriormente, a radiação térmica corresponde a uma fracção do espectro electromagnético relevante para o estudo de tintas reflectantes pois estas são caracterizadas pela elevada reflectância na gama do visível e infravermelho próximo. Este facto é muito importante para a compreensão do desempenho deste tipo de tintas, pois sabe-se que 89 % de toda a radiação que atinge a superfície terrestre corresponde a essas duas faixas espectrais [PRADO & FERREIRA, 2005].

Radiação solar

A radiação solar corresponde à radiação electromagnética emitida pelo sol cujo espectro apresenta comprimentos de onda compreendidos entre 0,28 e $3,0 \mu\text{m}$ [CASTRO, 2002]. Observando o espectro electromagnético (figura 2.2) é possível perceber que a radiação solar e infravermelha são partes constituintes da radiação térmica.

O espectro solar abrange três regiões: ultravioleta, visível e infravermelho. A região dos ultravioletas está compreendida entre 0,1 a $0,4 \mu\text{m}$ e divide-se em três grupos: o ultravioleta UV-A ($0,315$ a $0,4 \mu\text{m}$), ultravioleta UV-B ($0,28$ a $0,315 \mu\text{m}$) e ultravioleta UV-C ($0,1$ a $0,28 \mu\text{m}$). Embora praticamente absorvida na sua totalidade pela camada de ozono, a radiação ultravioleta é muito energética, podendo causar diversos efeitos, como a descoloração de pinturas. A região do ultravioleta responsável pelo desgaste da matéria situa-se no intervalo $0,30$ a $0,38 \mu\text{m}$ [CASTRO, 2002].

Para analisar o desempenho de produtos cujas propriedades radiativas determinam o seu comportamento térmico quando irradiados pela radiação solar, é recorrente o uso da distribuição espectral de referência solar (figura 2.3).

Na figura 2.3 são apresentadas as curvas de distribuição espectral da energia solar acima da atmosfera terrestre (ETR) e ao nível do mar (Radiação Global ou Irradiação Solar Hemisférica), conforme publicado na norma ASTM G173-03 [ASTM, 2012b]. As condições adoptadas nesta norma representam uma média para os 48 estados dos Estados Unidos da América para uma superfície orientada a Sul, com inclinação de 37° e em condições atmosféricas específicas.

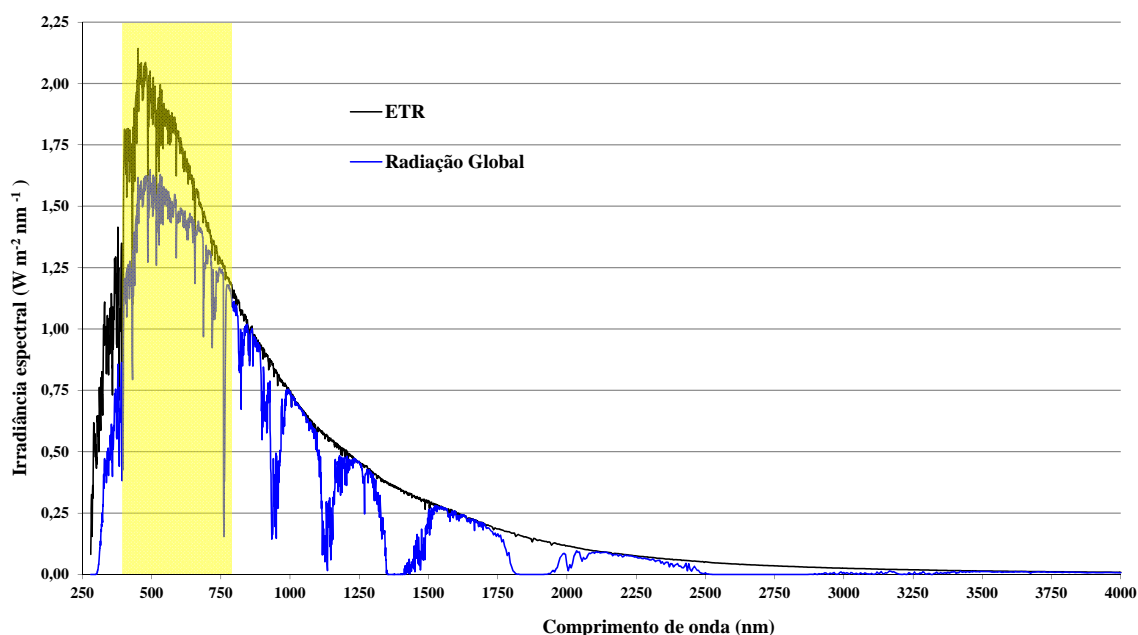


Fig. 2.3: Distribuições espectrais de referência da irradiância espectral solar terrestre adaptado de [ASTM, 2012b]

Tendo em conta a falta de dados específicos relativos a Portugal adoptou-se os dados publicados na ASTM G173-03. A zona sombreada na figura 2.3 representa a região do visível e compreende a faixa espectral para a qual o olho humano é sensível, originando a sensação de visão e cor.

A Radiação Global resulta da soma de duas parcelas:

- Radiação Directa - Parcela de radiação solar que passa livremente e incide sobre a superfície terrestre com diferentes ângulos que dependem da posição relativa do Sol a cada momento.
- Radiação Difusa - Parcela de radiação solar dispersa pela atmosfera que é refletida pelas nuvens.

A proporção entre as parcelas depende do clima, altitude e das diversas características atmosféricas (nebulosidade, presença de vapor de água, poluição) do local em estudo. A curva de Radiação Global permite identificar a proporção de energia proveniente do Sol correspondente a cada região do espectro solar que atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre. Pode ser distribuída nas seguintes proporções aproximadas: 3% no ultravioleta, 47% no visível e 50% no infravermelho. O pico de irradiância espectral ocorre a $0,61 \mu\text{m}$ e é perceptível que apenas uma pequena parte da radiação solar corresponde a comprimentos de onda superiores a $2,3 \mu\text{m}$.

As proporções em que a radiação solar se divide explicam a importância que as tintas reflectantes podem ter no desempenho térmico de um edifício. O facto de uma grande parcela da radiação que atinge a superfície terrestre ser infravermelha favorece este tipo de revestimentos, permitindo tirar partido dos elevados valores de reflectância que apresentam neste comprimento de onda.

Radiação Infravermelha

Uma superfície, quando aquecida, aumenta a sua temperatura e a energia emitida. Este fenómeno resulta do aumento da agitação térmica das partículas atómicas, que origina uma forma de radiação

electromagnética conhecida por radiação infravermelha [MADALGUE, 2001a]. Recorrendo a uma câmara termográfica é possível obter padrões de temperaturas superficiais em função da radiação emitida pela superfície.

A região do Infravermelho apresenta uma gama de comprimento de onda que varia dos 0,78 aos 1000 μm e que usualmente se subdivide em três grandes intervalos [MADALGUE, 2001b]:

- o infravermelho próximo ou NIR (0,78 a 1,5 μm);
- o infravermelho médio ou MIR (1,5 a 20 μm);
- o infravermelho longínquo ou FIR (20 a 1000 μm).

A subdivisão permite distinguir regiões dentro da gama do infravermelho que potenciam as capacidades de um detector de infravermelho. Por exemplo receptores térmicos como uma câmara termográfica funcionam no infravermelho médio ou MIR.

É de salientar que, a qualquer temperatura acima do zero absoluto, um objecto emite energia a partir da superfície na forma de um espectro com diferentes comprimentos de onda e intensidades, sendo esta emissão não uniforme em todas as direcções. O espectro emitido pela superfície depende da respectiva temperatura absoluta e emitância, sendo esta última aprofundada na secção 2.3. O fenómeno da emissão apenas poderá ser totalmente compreendido com a introdução do conceito de corpo negro.

2.2.5 Radiação do corpo negro

O conceito de corpo negro é fundamental para a compreensão do fenómeno de emissão térmica, sendo definido como um objecto que absorve toda a radiação incidente a que está sujeito, independentemente do comprimento de onda e direcção. Além de ser um absorsor total perfeito, um corpo negro possui também a propriedade (segundo a Lei de Kirchhoff) de reemitir toda esta energia, até ser atingido o equilíbrio termodinâmico com o meio envolvente, sendo também designado como o perfeito radiador. A verdade é que na realidade não existem corpos negros perfeitos embora funcione como conceito matemático.

A radiação emitida pelo corpo negro pode ser descrita pelas seguintes três leis [HART, 1991]:

- Lei de Planck

Descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro ou poder emissivo espectral, que se traduz na seguinte equação:

$$E_{\lambda T} = \frac{2 \cdot \Pi \cdot h \cdot c^2 \cdot \lambda^{-5} \cdot 10^{-6}}{e^{(h \cdot c \cdot \lambda^{-1} \cdot K^{-1} \cdot T^{-1}) - 1}} \quad (2.7)$$

Nesta equação $E_{\lambda T}$ é a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro a um determinado comprimento de onda λ (μm) e temperatura T (K) e :

c = Velocidade da luz [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

h = Constante de Planck [$\text{J} \cdot \text{s}$]

K = Constante de Boltzmann [$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$]

T = Temperatura termodinâmica (K)

Quando apresentada sob a forma gráfica, a fórmula de Planck apresenta-se como um conjunto de curvas, função do comprimento de onda e da temperatura, e é representada na figura 2.4.

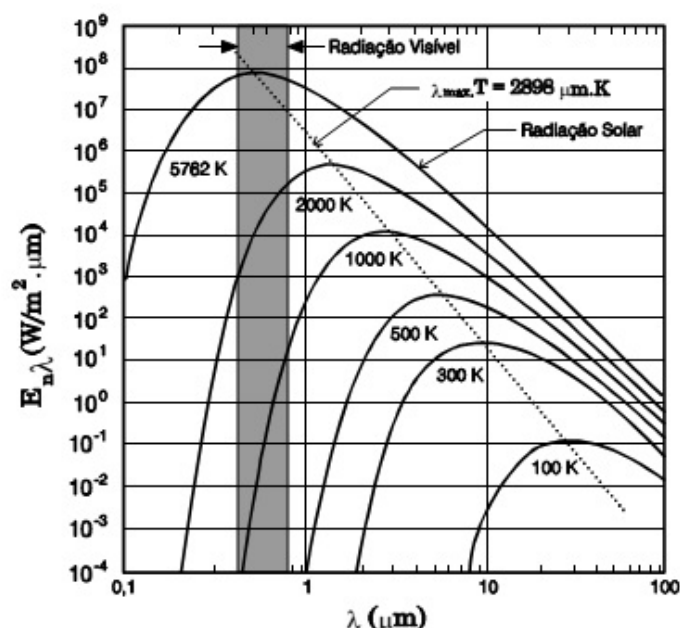


Fig. 2.4: Distribuição espectral da radiação emitida por um corpo negro adaptado de [MATIAS, 2001]

Um corpo cuja temperatura seja 300 K (27 °C) apresenta uma intensidade de radiação que varia dos 3 μm a 100 μm, localizando-se assim na região infravermelha do espectro (figura 2.4). É possível observar que, para uma dada temperatura, o poder emissivo varia continuamente com o comprimento de onda; quanto mais elevada for a temperatura da superfície, menor é o comprimento de onda no qual é atingido o valor máximo do poder emissivo.

Este facto é importante quando se pretende utilizar técnicas termográficas. A transmissão da energia infravermelha através da atmosfera depende do comprimento de onda, existindo gamas de comprimento de onda correspondentes a zonas onde a absorção pelos gases não é significativa, permitindo a transmissão da energia electromagnética. A transmissão da energia infravermelha é mais elevada na gama 3 - 4 μm e 8 - 13 μm. Desta forma é perceptível que a câmara termográfica seja sensível a comprimentos de onda nos intervalos 3 a 5,6 μm e 8 a 12 μm onde a transmissão é maior. Por exemplo, corpos a temperaturas de 10 - 60 °C têm valores máximos de radiação para o intervalo 9 - 13 μm, incluindo assim grande parte da radiação emitida quando se efectua termografias de edifícios.

- Lei de Wien

A seguinte equação traduz o deslocamento do máximo valor de poder emissivo, tendo em conta a temperatura, e é obtida derivando a equação 2.7 em ordem ao comprimento de onda.

$$\lambda_{max} = 2898 \cdot T^{-1} \quad (2.8)$$

Assim um corpo que esteja a uma temperatura ambiente de 290 K (17 °C) atinge o valor máximo de poder emissivo para um comprimento de onda de 10 μm, situado na zona dos infravermelhos. Se o

mesmo exercício for feito para o Sol, que possui uma temperatura superficial de aproximadamente 5800 K, a curva de variação do poder emissivo associado a esta temperatura (fig. 2.4) mostra a existência de um pico da radiação emitida para um comprimento de onda na região da luz visível com $\lambda = 0,5 \mu m$. Este facto explica o porquê da radiação emitida pelo Sol ser detectável pelo olho humano.

- Lei de Stefan-Boltzmann

Integrando a equação 2.7 para todos comprimentos de onda ($0 < \lambda < \infty$) obtém-se o poder emissivo total para um corpo negro, dado pela seguinte expressão:

$$E^0 = \sigma \cdot T^4 \quad (2.9)$$

Nesta equação $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$ e é designada por constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura absoluta em Kelvin (K).

A equação anterior representa a área abaixo da curva de Planck (figura 2.4) para uma determinada temperatura.

O poder emissivo pode ser definido então como o fluxo de calor radiativo emitido por uma superfície e ser apresentado de duas formas: como poder emissivo total e como poder emissivo espectral ou monocromático. A primeira definição (equação 2.9) é utilizada quando o fluxo de calor emitido engloba o espectro completo, enquanto na segunda este fluxo é apresentado em função de um comprimento de onda específico (equação 2.7).

Anteriormente, definiu-se o corpo negro como um emissor e absorvedor perfeito. Esta definição permite concluir que nenhum corpo real pode emitir ou absorver mais energia, a uma dada temperatura, do que um corpo negro. Assim sendo o corpo negro é o padrão com o qual os corpos reais são comparados.

2.2.6 Radiação do corpo não negro

Como referido anteriormente, na realidade não existem corpos negros perfeitos, embora uma superfície possa apresentar um comportamento próximo do de um corpo negro dentro de uma gama espectral específica. Assim sendo, as expressões anteriormente apresentadas não podem ser aplicadas, pelo menos de forma directa.

Um corpo não negro ou corpo “real” apresenta um comportamento diferente do corpo negro quando é irradiado. Assim sendo, uma fracção da radiação incidente pode ser absorvida (α), sendo a restante reflectida (ρ) e transmitida (τ). Em geral, as fracções de radiação incidente absorvida, reflectida e transmitida dependem de vários factores, como o comprimento de onda, direcção, temperatura, mas também da qualidade da superfície (rugosidade e presença de contaminantes), sendo este assunto abordado na secção 2.4.2 [MADALGUE, 2001b].

A nomenclatura utilizada para propriedades radiantes de materiais varia consideravelmente na literatura. Uma questão que frequentemente ocorre é sobre o significado das terminações “ividade” e “tância”. Segundo MODEST (2003), o NIST recomenda o uso da terminação “sividade” para descrever as propriedades radiantes de materiais com superfícies perfeitamente lisas e a terminação “tância” para superfícies rugosas e contaminadas. A American Society for Testing and Materials ou ASTM também recorre à terminação “tância” para referir as propriedades radiantes de materiais.

A maioria das superfícies reais correspondem ao tipo descrito em último, assim como, as superfícies alvo de estudo neste trabalho. Com base no que foi referido anteriormente a terminação “tância” será utilizada para descrever essas mesmas propriedades: absortância, reflectância, transmitância e emitância (abordada na secção 2.3).

Embora as três propriedades da superfície sejam dependentes do comprimento de onda, para um determinado comprimento de onda a soma das três deve ser igual à unidade. Esta relação é traduzida pela seguinte expressão:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.10)$$

Nesta equação:

- α_{λ} Corresponde à absortância espectral e representa o rácio entre o poder radiante espectral absorvido pelo objecto e o poder radiante total espectral que sobre este incide.
- ρ_{λ} Corresponde à reflectância espectral e representa o rácio entre o poder radiante espectral reflectido pelo objecto e o poder radiante total espectral que sobre este incide.
- τ_{λ} Corresponde à transmitância espectral e representa o rácio entre o poder radiante espectral transmitido pelo objecto e o poder radiante total espectral que sobre este incide.

As propriedades radiativas apresentadas na expressão anterior (equação 2.10) são adimensionais, variam entre 0 e 1 e são função da temperatura, do comprimento de onda e do ângulo de incidência da radiação que atinge o corpo.

A equação 2.10 respeita a lei da conservação da energia, em que todas as trocas de energia são compensadas mutuamente. Na prática a energia que o corpo absorve é compensada pela energia que este emite, atingindo-se o equilíbrio do sistema. A figura 2.5 ilustra as quatro componentes, resultantes da incidência de radiação numa superfície.

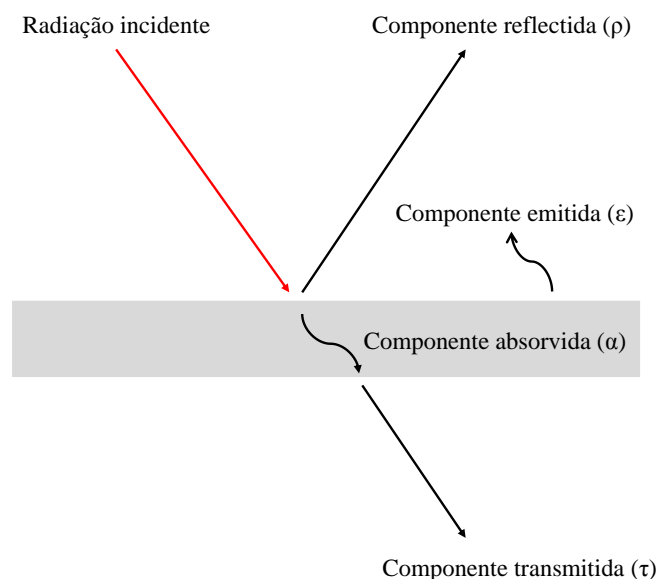


Fig. 2.5: Absorção, reflexão, emissão e transmissão da radiação que incide numa superfície.

Uma superfície preta que absorva a totalidade da radiação incidente, apresenta valores de $\alpha = 1$ e $\rho = \tau = 0$. Quando a radiação transmitida através do corpo for nula ($\tau = 0$), o corpo no qual a radiação incide é designado por opaco, respeitando a seguinte expressão:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.11)$$

A maioria dos materiais usados em construção civil são considerados opacos. Uma excepção, por exemplo, é um vidro normal de um vão envidraçado. Este é quase totalmente transparente à radiação solar mas é razoavelmente opaco à radiação emitida por uma superfície à temperatura ambiente, cujo comprimento de onda (na gama do infravermelho) difere da radiação solar [HART, 1991]. As propriedades destes materiais correspondem às propriedades radiativas das suas superfícies, visto que a interacção entre a radiação e o material ocorre apenas à superfície (a poucos micrómetros de profundidade). No caso da radiação incidente num corpo ser totalmente transmitida ($\tau = 1$), este é designado por transparente. Numa situação intermédia, o corpo é denominado por semitransparente.

Existe ainda uma relação importante entre as propriedades radiativas de uma superfície. Se as temperaturas da superfície de um corpo e das superfícies envolventes forem da mesma ordem de grandeza e o sistema por elas constituído estiver em equilíbrio termodinâmico, é possível considerar que os valores da absorptância e da emitância da superfície do corpo são iguais. Esta igualdade é conhecida por Lei de Kirchhoff, traduzida pela equação 2.12 [MADALGUE, 2001a].

$$\varepsilon_{\lambda\theta} = \alpha_{\lambda\theta} \quad (2.12)$$

Nesta equação $\varepsilon_{\lambda\theta}$ corresponde à emitância direcciona espectral e $\alpha_{\lambda\theta}$ à absorptância direcciona espectral.

A equação acima indica que a capacidade para emitir radiação de um meio, a um comprimento de onda e direcção específicos, é igual à capacidade para absorver a mesma radiação. No entanto, quando a superfície de um corpo é irradiada por radiação solar, a lei anterior não é válida, pois introduz um erro demasiadamente elevado. Esta situação é explicada pelo facto da radiação solar apresentar mais de 50 % da radiação no visível. Observando a figura 2.4 é possível observar que 95 % da radiação do corpo negro se encontra no intervalo espectral de $0,5 \mu m$ a $5 \mu m$ [MADALGUE, 2001a]. Este facto revela ser importante porque permite restringir, tanto a emitância direcciona espectral, como a emitância hemisférica espectral, ao intervalo referido, pois a luminância espectral do corpo negro é negligenciável fora desse mesmo intervalo.

O balanço radiativo resultante da Lei de Kirchhof permite obter uma relação directa para obtenção da emitância direcciona espectral, para um corpo opaco, expressa na equação 2.13.

$$\varepsilon_{\lambda\theta} = 1 - \rho_{\lambda\theta} \quad (2.13)$$

Nesta equação $\rho_{\lambda\theta}$ corresponde à reflectância direcciona espectral da superfície.

Desta forma, a equação 2.10 poderá ser reescrita da seguinte forma:

$$\varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.14)$$

Assim sendo, revela ser importante a introdução do conceito de radiosidade (J) (W/m^2), que resulta do somatório da energia emitida com a reflectida (equação 2.15). A energia emitida pela superfície é função da sua temperatura e emitância, enquanto que a reflectida depende da irradiação que sobre esta incide.

$$J = \varepsilon \cdot E^0 + \rho \cdot G \quad (2.15)$$

em que G é a irradiação (W/m^2) da superfície.

O quadro 2.1 apresenta os valores e simplificações das propriedades radiativas de diferentes tipos de superfície.

Quadro 2.1: Valores particulares das propriedades radiantes de superfícies [HART, 1991]

	ε_λ	ρ_λ	τ_λ
Corpo negro	1	0	0
Corpo transparente	0	0	1
Corpo cinzento	ε_λ constante e E_λ constante		
Superfície opaca	$\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$		
Espelho	0	1	0

2.3 Emitância

O conceito de emitância revela ser de extrema importância na compreensão dos processos associados a ganhos e perdas de calor pelas superfícies. A transferência de calor pode ocorrer por condução, radiação e convecção ou pela combinação destes fenómenos. O trabalho desenvolvido centra-se na transferência de calor que ocorre quando um material é irradiado por uma determinada fonte de energia seja esta, natural (Sol) ou artificial (placa de aquecimento). Foi verificada a influência da emitância das diferentes tintas analisadas no desempenho térmico das superfícies onde estão aplicadas.

A emitância descreve a fracção de poder emissivo do corpo negro que é produzida por um corpo não negro a uma temperatura específica. Recorrendo à Lei de Stefan-Boltzmann (equação 2.9), o poder emissivo (E) de um corpo qualquer é dado pela seguinte equação:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.16)$$

Nesta equação $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$, ε é a emitância e T a temperatura absoluta em Kelvin (K).

A equação 2.17 demonstra que a emitância é função da temperatura termodinâmica da superfície, do comprimento de onda da radiação incidente e da direcção dessa mesma radiação [HART, 1991].

$$\varepsilon = f(T, \lambda, \phi) \quad (2.17)$$

Desta forma, é possível entender que a emitância de uma superfície é um parâmetro importante para a Termografia de infravermelhos. Além de depender das condições específicas de cada medição (ângulo de observação, comprimento de onda e temperatura) depende também do estado da superfície (vd secção 2.4.2). Para caracterizar a dependência angular e espectral da emitância no comportamento de um material real é necessário definir quatro parâmetros [MADALGUE, 2001a]:

- Emitância hemisférica total

$$\varepsilon = \frac{E}{E^0} \quad (2.18)$$

Sendo E ($W \cdot m^{-2}$) o poder emissivo da superfície e E^0 ($W \cdot m^{-2}$) o poder emissivo total do corpo negro.

- Emitância direccional total

$$\varepsilon_\theta = \frac{L}{L^0} \quad (2.19)$$

Sendo L ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) a luminância da superfície e L^0 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$) a luminância total do corpo negro.

- Emitância hemisférica espectral

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_\lambda^0} \quad (2.20)$$

Sendo E_λ o poder emissivo espectral da superfície e E_λ^0 o poder emissivo espectral (ou monocromático) do corpo negro.

- Emitância direccional espectral

$$\varepsilon_{\lambda\theta} = \frac{L_\lambda}{L_\lambda^0} \quad (2.21)$$

Sendo L_λ a luminância espectral da superfície e L_λ^0 a luminância espectral do corpo negro.

A luminância (L) pode ser definida como a grandeza que quantifica o fluxo de energia que passa uma pequena área dS , dentro de um determinado ângulo, segundo uma direcção que faz um ângulo θ com a normal da superfície. Esta grandeza é quantificada na parte experimental deste trabalho, avaliando-se a sua variação consoante o tipo e cor da tinta aplicada nos dois tipos de superfície (lisa e rugosa) e para diferentes ângulos de incidência da luz (secção 5.2.2).

O estudo da emitância é um problema complexo devido aos múltiplos parâmetros que a influenciam. Para simplificar a análise e compreensão da emitância assumem-se dois pressupostos:

- A superfície é cinzenta, isto é, as propriedades radiativas não dependem do comprimento de onda:

$$\varepsilon_{\lambda\theta} = \varepsilon_\theta \quad (2.22)$$

e

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon \quad (2.23)$$

- A superfície é difusa, isto é, as propriedades radiativas não dependem do ângulo de emissão:

$$\varepsilon_{\lambda\theta} = \varepsilon_\lambda \quad (2.24)$$

e

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon \quad (2.25)$$

A análise termográfica apresenta melhores resultados quando aplicada em superfícies com elevada emitância. Esta propriedade influencia directamente a qualidade e fiabilidade da termografia obtida, e consequente, o respectivo diagnóstico.

Este facto é verificado pela Lei de Stefan-Boltzmann (equação 2.9), pois superfícies com emitância mais elevada emitem com maior intensidade a uma determinada temperatura. Assim sendo, o sinal captado pelo detector da câmara termográfica é maior, traduzindo-se em termografias de melhor qualidade. Superfícies de elevada emitância também absorvem grande parte da energia radiante. Desta forma, é possível obter os gradientes térmicos necessários para desenvolver ensaios usando Termografia de infravermelhos.

É importante considerar que, pelas expressões apresentadas anteriormente, superfícies com elevada emitância são reflectores fracos. Este facto é particularmente relevante porque diminui as reflexões provenientes de outras fontes, que reduzem a sensibilidade da técnica termográfica, pois a câmara termográfica irá captar energia que não corresponde à temperatura da superfície analisada [MADALGUE, 2001a].

Algumas consequências práticas do que foi referido anteriormente materializam-se em superfícies de emitância elevada, numa diminuição da temperatura superficial mais fácil e de forma mais rápida, enquanto que se forem de emitância baixa tendem a reter a energia absorvida dentro dos materiais de construção com efeitos negativos na dissipação do calor [ZINZI & FASANO, 2009].

2.4 Reflectância

Normalmente, quando a luz incide numa superfície, esta aparenta ser mais brilhante. Isto acontece porque alguma da luz que incide é reflectida. Normalmente a reflexão pode ser observada de qualquer direcção, apresentando a intensidade máxima na direcção da reflexão especular (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão) [B & K Instruments, 1978].

2.4.1 Comportamento de superfícies reflectantes

Neste sentido, o comportamento reflectivo de uma superfície é caracterizado pela forma como esta reflecte a luz incidente. Quando a luz obedece à lei da reflexão (figura 2.6), é designada por reflexão especular. Significa que o ângulo entre o raio incidente e a normal à superfície (i) é igual ao ângulo entre o raio reflectido e a normal (r).

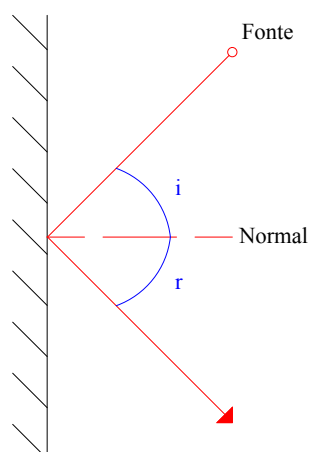


Fig. 2.6: Lei da reflexão

Quando a reflexão não é especular mas é difusa, significa que a luz é reflectida uniformemente em todas as direcções. Mas na realidade não existe um difusor perfeito, tratando-se de uma abstracção física. O que se verifica é que a generalidade das reflexões resultam da combinação de ambas as componentes, difusa e especular.

Nas figuras 2.7, 2.8 e 2.9 ilustram-se as diferentes formas de reflexão [RYER, 1998].

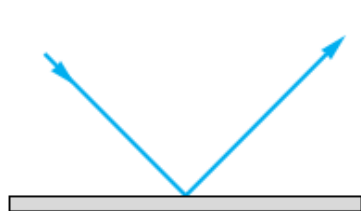


Fig. 2.7: Reflexão especular



Fig. 2.8: Reflexão difusa

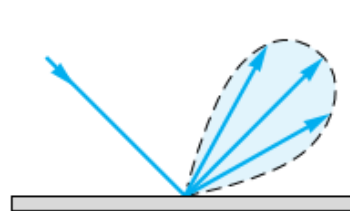


Fig. 2.9: Reflexão dispersa

Um exemplo da combinação das duas componentes é quando a luz é dispersa (figura 2.9) apresentando uma componente direccional dominante, que é parcialmente difundida consoante a irregularidade da superfície.

2.4.2 Factores que influenciam a reflectância

A variação da reflectância de uma superfície depende do contributo de diversos factores, cuja influência determina a fracção de radiação incidente reflectida pela superfície. Uns influenciam a radiação incidente, outros as características da própria superfície, mas todos apresentam uma maior ou menor preponderância na capacidade de uma superfície para reflectir.

Condições de exposição

A alteração das condições meteorológicas provoca variações da reflectância da superfície. Estas podem ser devidas a uma maior ou menor intensidade da incidência solar, ocorrência de precipitação, vento, variação da humidade relativa e velocidade do vento. Todos estes agentes climáticos directa ou indirectamente influenciam a capacidade de uma superfície reflectir [PRADO & FERREIRA, 2005]. A

influência das condições de exposição na reflectância solar de uma superfície foi igualmente analisada neste trabalho (secção 5.3.1).

Cor da superfície

A cor da superfície contribui de forma decisiva para uma maior ou menor reflectância solar. Uma superfície escura tem elevada absorptância, absorvendo grande parte da radiação solar incidente. Por outro lado, a superfície branca tem uma baixa absorptância, reflectindo a maior parte da radiação solar que incide sobre si, sendo por esta razão menos sensível à radiação solar do que a superfície escura.

Segundo BERDAHL & BRETZ (1997) materiais com cores claras, como o branco, apresentam maior reflectância na região do visível e tendem a ter maior reflectância no infravermelho próximo. No entanto, elevada reflectância na região de visível não implica que o mesmo ocorra no espectro solar completo.

O trabalho realizado por PRADO & FERREIRA (2005) conclui que o desempenho reflectivo de uma superfície está directamente relacionada com a reflectância na gama de infravermelho (NIR). Observou-se que a reflectância solar é determinada pela sua reflectância na gama do visível e no infravermelho, que representam aproximadamente 89% de toda a radiação que atinge a superfície terrestre. A influência da cor na reflectância solar e a sua variação foi igualmente analisada neste trabalho (secção 5.2.1).

Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é definida pelas irregularidades geométricas que apresenta. Segundo BERDAHL & BRETZ (1997) a reflectância corresponde à probabilidade de um fóton incidente ser reflectido quando encontra uma superfície. Se a superfície em questão é rugosa em vez de lisa, é provável que o fóton necessite de uma ou mais reflexões adicionais antes de mudar de direcção.

No estudo efectuado por D. SEKER (1996) observou-se que ao aumento de rugosidade da superfície corresponde um incremento de absorção de energia solar pela superfície. O resultado obtido deve-se ao crescimento da possibilidade do raio reflectido, a partir de qualquer ponto da superfície, incidir novamente no objecto. Assim sendo, na escolha do tipo de revestimento exterior de um edifício deve-se ter em conta a rugosidade superfície pois esta influencia os ganhos térmicos. Tal como as condições de exposição e cor, também a influência da rugosidade de uma superfície foi analisada neste trabalho (secção 5.2.1).

Estado da superfície

A exposição diária aos vários agentes climáticos origina a degradação da superfície e consequente perda das propriedades reflectantes. O envelhecimento da superfície é potenciado por poluentes atmosféricos, biológicos e pela acção da radiação ultravioleta. Segundo BRETZ *et al.* (1998) não se deve ter apenas em conta a reflectância solar inicial mas também a reflectância solar durante a vida útil da superfície em consideração. O estado da superfície e sua degradação, foi igualmente averiguado neste trabalho (secção 5.3.1).

A sujidade e a oxidação de materiais escuros tendem a aumentar a reflectância ao longo do tempo. Em contraste, materiais de cor clara tendem a diminuir a reflectância, à medida que a sujidade se acumula na superfície. Num estudo efectuado, com uma amostra de 25 coberturas com revestimento branco,

verificou-se uma diminuição da reflectância solar no primeiro ano de 15% , seguido por um declínio anual de 2% nos anos seguintes [BRETZ & AKBARI, 1997].

2.4.3 Influência da reflectância no desempenho térmico

De acordo com BERDAHL & BRETZ (1997), as temperaturas superficiais exteriores de um edifício podem ser reduzidas pelo aumento da reflectância solar e/ou da emitância da superfície. A minimização da temperatura superficial resulta de uma reflectância solar ou albedo¹ elevados, reduzindo desta forma o ganho de calor pela envolvente. Quando a emitância é elevada aumenta-se o arrefecimento radiativo. Desta forma, é possível reduzir o consumo de energia para arrefecimento em edifícios com ar condicionado e elevar-se o conforto dos ocupantes em edifícios sem ar condicionado.

Estudos de simulação estimam que a cor da cobertura reflectante pode reduzir as cargas de arrefecimento em 10 - 60% nos edifícios, sendo os valores mais elevados referentes a sistemas de cobertura sem isolamento térmico. Segundo PARKER & BARKASZI (1997) a utilização deste tipo de revestimentos reflectantes podem permitir reduzir os custos energéticos e financeiros associados ao uso do ar condicionado em edifícios. Nesse estudo, verificou-se uma redução dos gastos energéticos associados ao ar condicionado de 2 - 43% nos diferentes locais analisados.

O estudo publicado por SYNNEFA *et al.* (2007) refere que a utilização de revestimentos reflectantes ou *cool* em coberturas de edifícios representa uma solução passiva e com potencial, que pode contribuir para a redução das cargas de arrefecimento em edifícios com ar condicionado e para a melhoria das condições de conforto térmico. Por exemplo, demonstrou-se que com o aumento da reflexão solar de 0,2 para 0,65, é possível obter poupanças entre 10,7% e 27% na carga de arrefecimento (kWh/m²), consoante as condições climáticas específicas.

Muitos dos estudos publicados acerca da aplicação de tintas *cool* referem-se a coberturas, pois correspondem a uma zona do edifício sujeita a longos períodos de exposição solar, e consequentemente, elevados ganhos térmicos. No entanto, a utilização de revestimentos reflectantes em fachadas também pode apresentar melhorias no desempenho térmico e conforto térmico dos ocupantes de um edifício.

Segundo BRETZ *et al.* (1998) a envolvente vertical do edifício (paredes) também pode desempenhar um papel importante no desempenho térmico de um edifício. As paredes absorvem a radiação solar a ângulos baixos do sol, particularmente quando orientadas a Sul e Oeste, o que no período de Verão, contribui significativamente para as cargas de arrefecimento. O facto das paredes serem tipicamente repintadas a cada 10 anos, significa que nesse momento poderão ser repintadas com uma cor mais favorável para o desempenho térmico no Verão, seleccionando uma cor mais clara, sem custos adicionais.

A transmissão de calor por condução através da envolvente dos edifícios, quer sejam as perdas de calor através dos elementos construtivos da envolvente no Inverno, quer sejam os ganhos indesejáveis de calor através dos mesmos elementos no Verão, são fenómenos que determinam o comportamento térmico dos edifícios. Tal como foi referido anteriormente, um aumento da reflectância solar contribui para a diminuição da temperatura superficial e, consequentemente, dos ganhos térmicos indesejáveis em período de Verão.

Mas a melhoria do desempenho térmico não se cinge apenas ao contributo para o conforto térmico dos ocupantes de um edifício. Uma fracção significativa do consumo de energia no planeta está

¹ Sinónimo de reflectância solar, normalmente usado quando se refere a coberturas

relacionado com os edifícios, sendo 40% do consumo de energia correspondente ao sector da construção e aproximadamente 15% de toda a eletricidade consumida no Mundo é utilizada para refrigerar edifícios [SONG et al., 2013].

De acordo com ROSENFELD *et al.* (1995), o aumento da reflectância solar de superfícies urbanas e da vegetação urbana revelam ser maneiras fáceis de economizar energia, poupar dinheiro e, provavelmente, reduzir a poluição do ar. Estudos efectuados apresentam poupanças directas de energia entre os 20% e os 40%, com o simples aumento da reflectância solar de um único edifício. Simulações computadorizadas revelam que o valor de energia poupado directamente pode duplicar, se a mudança da reflectância solar for efectuada em larga escala.

Capítulo 3

Termografia de infravermelhos

3.1 Introdução

A Termografia de infravermelhos pode ser definida como o mapeamento térmico de padrões da temperatura superficial de um objecto. Estes mapas são produzidos por instrumentos termográficos como a câmara termográfica e designam-se por termografias ou termogramas. Métodos de análise não destrutiva, como a Termografia de infravermelhos, baseiam-se no princípio de que a presença de certos tipos de anomalias alteram o fluxo de calor através do material, permitindo a sua identificação no termograma [MADALGUE, 2001a].

A análise de uma termografia não pode ser reduzida apenas à identificação de anomalias. A influência das diferentes propriedades radiativas dos materiais, apresenta um peso significativo no que se “vê” no termograma, sendo a sua caracterização, um factor importante na descodificação do padrão térmico, que muitas vezes não é de fácil interpretação.

Método de análise não-destrutiva

A Termografia de infravermelhos é considerado um método de análise não destrutiva pois não induz, no objecto analisado, qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais. É por isso um método vantajoso, não só porque é uma técnica não invasiva que permite a monitorização e diagnóstico das condições do edifício, mas também porque permite operar à distância.

A câmara de infravermelhos

Uma câmara de infravermelhos mede e reproduz, em imagens térmicas visíveis, a radiação de infravermelho emitida pelos objectos. As câmaras usadas na inspecção de edifícios captam a radiação emitida pelos objectos no intervalo de comprimento de onda compreendido entre 8 a 14 μm . Existem ainda, câmaras termográficas que trabalham com comprimentos de onda mais pequenos, no intervalo 3 a 5 μm .

A figura 3.1 apresenta a configuração básica de uma câmara termográfica, mostrando os componentes essenciais para obter termografias.

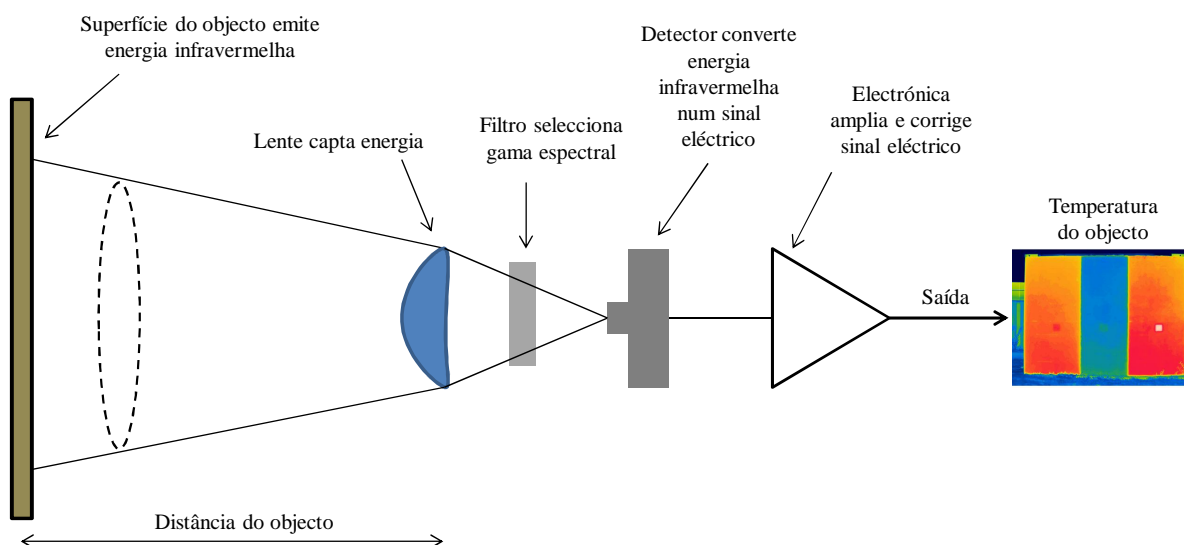


Fig. 3.1: Configuração básica de uma câmara termográfica adaptado de [MADALGUE, 2001a]

As dimensões das câmaras termográficas tem vindo a diminuir ao longo do tempo, facilitando a sua utilização e permitindo períodos de funcionamento cada vez mais extensos. A utilização de câmaras com lentes de elevada performance, como a utilizada no âmbito deste trabalho (640 x 480 pixels), permitem obter termogramas com melhor resolução e consequentemente maior precisão. O aumento do número de pixels irá resultar numa imagem muito mais nítida, onde pequenos detalhes são claramente visíveis. Tal significa que as medições de temperatura serão muito mais precisas. Este facto é de extrema importância quando se pretende identificar pequenas anomalias e avaliar a distribuição real de temperaturas naquela zona.

3.2 Análise termográfica

No domínio da termografia de edifícios as aplicações mais habituais da análise termográfica visam a avaliação da qualidade térmica da envolvente, a identificação de zonas com anomalias como presença de humidade, infiltração ou exfiltração de ar através dos elementos da envolvente, sendo por isso uma técnica com extensa aplicabilidade [MATIAS, 2004]. Desta forma, a Termografia de infravermelhos prova ser uma técnica a considerar, como ferramenta válida, na manutenção e monitorização de edifícios.

Segundo AVDELIDIS & MOROPOULOU (2004), a Termografia de infravermelhos fornece informações importantes para a avaliação de materiais e técnicas para a protecção do património cultural. Em particular, pode ser utilizada com eficácia na avaliação do estado de conservação dos materiais e de limpeza da superfície, estado de consolidação e necessidade de conservação. Permite também determinar características do substrato, que não sejam visíveis a olho nu.

O estudo publicado por EDIS *et al.* (2014) revela que a Termografia é uma ferramenta útil na detecção de problemas de humidade em fachadas com revestimento cerâmico aderente, quantificando as variações de temperatura superficial e humidade em 16 edifícios e comparando posteriormente os resultados obtidos, com resultados alcançados com simulações numéricas.

Outra aplicação inovadora de Termografia é a modelação de imagens 3D baseadas em termogramas com o intuito de avaliar a eficiência energética das fachadas dos edifícios. De acordo com

GONZÁLEZ-AGUILERA *et al.* (2013) é possível gerar modelos 3D e imagens termográficas usando técnicas de modelagem automáticas, baseadas em imagens sem a necessidade de usar scanner a laser ou um equipamento topográfico. A análise destes modelos constituirá uma ferramenta útil em auditorias energéticas e no estabelecimento da eficiência energética do edifício.

3.2.1 Condições requeridas

Uma adequada interpretação da análise termográfica implica que se tenha em conta vários factores, em especial quando efectuada no exterior do edifício, pelo facto de estar sujeito às condições meteorológicas exteriores (radiação solar, vento, temperatura ambiente e precipitação). O conhecimento das cargas térmicas a que o elemento a avaliar está sujeito antes e durante a termografia revela ser de extrema importância, pois condiciona a interpretação dos termogramas obtidos. Por esta mesma razão, torna-se necessário determinar as condições meteorológicas que se verificam antes e durante a inspecção termográfica no exterior.

O estudo publicado por LEHMANN *et al.* (2013) identifica os principais parâmetros climáticos que influenciam a temperatura superficial das fachadas de edifícios e, desta forma, possibilita a determinação de critérios aceitáveis para efectuar Termografia de infravermelhos no exterior. Foi avaliada a sensibilidade da Termografia relativamente à radiação solar, velocidade do vento, temperatura exterior e a sua variação ao longo do tempo. Foi demonstrado que o comportamento térmico da superfície exterior da fachada depende fortemente da constituição da parede, particularmente das propriedades térmicas dos materiais utilizados. A radiação solar, em particular, a faixa espectral correspondente ao infravermelho, constituem os principais parâmetros influenciadores da temperatura superficial. Outra conclusão importante deste estudo refere que o comportamento de uma fachada não é devido apenas a um parâmetro, mas sim da acção conjunta de vários.

Por isso, a acção da radiação solar directa, vento ou temperatura exterior, influencia directamente os resultados obtidos numa termografia pelo exterior, recomendando-se que as termografias sejam efectuadas de forma a que, a acção destes intervenientes seja minorada ao máximo. Embora não seja possível eliminar a intervenção dos agentes climáticos, podem ser tomadas várias acções preventivas, que contribuem para minorar o seu efeito sobre a qualidade das termografias, designadamente:

- Evitar a exposição solar directa da fachada durante a inspecção, com o intuito de reduzir a interacção da radiação solar directa, assim como, a reflectida pelas superfícies envolventes.
- Garantir que existe um diferencial de temperatura de pelo menos 10 °C, entre o interior e exterior da parede, excepto quando já tenha sido insolada.
- Evitar efectuar a inspecção em períodos com velocidades de vento elevadas.
- A fachada não deve estar visivelmente molhada.

No âmbito deste trabalho, todas as paredes estudadas foram analisadas, em diferentes períodos do dia, pretendendo-se aferir daí, não só o desempenho térmico das tintas aplicadas mas também qual a melhor altura do dia para o fazer, tendo em consideração as restrições anteriormente referidas.

Aquando da análise termográfica, deve-se garantir que a câmara termográfica foca apenas a área em estudo, reduzindo a contribuição do ambiente em redor, potenciando a fiabilidade dos resultados e diminuindo o erro associado ao método, acrescido por se tratar de uma técnica *in situ*.

Outro factor que deve ser considerado aquando de uma inspecção termográfica pelo exterior é a atenuação atmosférica. A atmosfera é uma mistura complexa de vários gases, partículas e aerossóis com diferentes concentrações [MADALGUE, 2001a]. A transmissão da energia electromagnética através desta mistura é um processo complexo. Além da atenuação atmosférica resultante da propagação na atmosfera, os gradientes térmicos e a turbulência criam heterogeneidades no índice de refração do ar, que originam perturbações na medição do equipamento de termografia [BARREIRA, 2004]. Apesar destes factores, a atenuação atmosférica é a principal causa para erros na medição termográfica, sendo função da gama espectral, distância e condições meteorológicas. Existem duas causas fundamentais da atenuação atmosférica: a absorção molecular pelos gases constituintes e a difusão pelas partículas.

Na figura 3.2 é possível observar as “janelas de transmissão” através da atmosfera. Estas gamas de comprimento de onda (3 a 5 μm e 8 a 12 μm), correspondem a zonas onde a absorção pelos gases não é muito significativa, permitindo a transmissão quase total da energia electromagnética infravermelha.

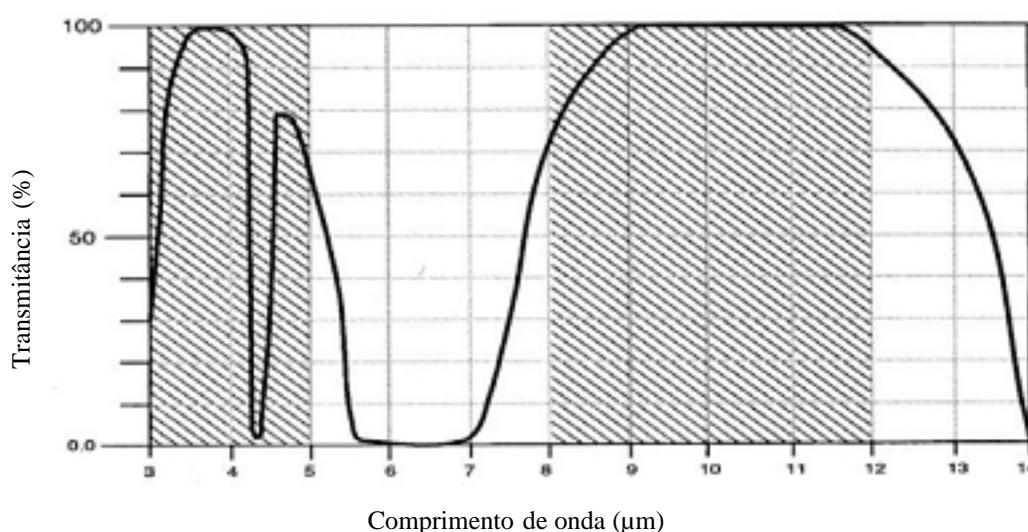


Fig. 3.2: Transmissão de energia electromagnética pela atmosfera adaptado de [MATIAS, 2014]

Segundo a Lei de Planck (equação 2.7) a faixa 8 - 12 μm é a mais apropriada quando se pretende medir radiação de objectos a temperaturas próximas da temperatura ambiente, pelo facto da intensidade da radiação ser mais elevada, dentro da referida faixa.

A faixa de onda curta (3 - 5 μm) é mais adequada para medir objectos com temperaturas muito elevadas. Nesse sentido, a faixa 8 - 12 μm corresponde à gama de comprimentos de onda mais adequada para medição em edifícios pois a corpos a temperaturas de 10 - 60 $^{\circ}\text{C}$ correspondem valores máximos de radiação para o intervalo 9 - 13 μm (Lei de Planck - equação 2.7). Como foi referido anteriormente, o equipamento utilizado funciona nessa gama.

Para uma interpretação adequada de uma análise termográfica não contribuem apenas factores climáticos ou materiais. A experiência do operador revela ser um factor também importante no sucesso da campanha termográfica, traduzido pela análise correcta e objectiva que faz dos termogramas mas também pela metodologia e configuração da câmara termográfica adoptadas.

Assim sendo, para uma correcta utilização e leitura dos termogramas é necessário configurar a câmara termográfica em função das condições encontradas no local e o tipo de material analisado. A configuração da câmara termográfica consiste na introdução de vários parâmetros:

- emitância do objecto (ε);
- humidade relativa (HR);
- distância do objecto (D_{obj});
- temperatura aparente reflectida (T_{refl});
- temperatura atmosférica (T_{atm}).

Todos estes parâmetros contribuem para a definição das condições de ensaio e características da superfície analisada, sendo a sua quantificação importante para os resultados obtidos. No entanto, a introdução incorrecta do valor de um, ou mais, parâmetros pode não influenciar a qualidade dos resultados, se o objectivo da inspecção for meramente qualitativo (secção 3.2.4).

Um parâmetro fundamental que deve ser correctamente estimado é a emitância. Embora grande parte dos materiais de construção correntes apresentem valores de emitância semelhantes, é necessário considerar que a parede de um edifício pode ser constituída por materiais distintos, que evidenciam padrões diferentes de temperatura na superfície, visto apresentarem emitâncias e reflectâncias diferentes. Este facto deve ser considerado na altura da análise termográfica.

Para se proceder à realização de intervenções termográficas adoptam-se procedimentos passivos ou activos, de forma, a garantir o aquecimento do elemento.

3.2.2 Método activo

O método activo recorre ao aquecimento do objecto em análise por acção de um fluxo térmico imposto, quer naturalmente (por incidência da radiação solar), quer artificialmente recorrendo a lâmpadas ou outros dispositivos emissores de forte radiação térmica. A interacção e a resposta do objecto, quando irradiado, são factores que determinam a adopção de precauções e de procedimentos particulares na utilização deste método [MATIAS, 2004]. É importante salientar que outros autores consideram o aquecimento solar do objecto um método passivo, por considerarem o Sol um elemento natural [EDIS et al., 2014].

No método activo, o fluxo de calor que atravessa o elemento é produzido por uma fonte externa, como o Sol ou um dispositivo emissor de calor (óptico ou mecânico). Os defeitos que possam existir no elemento analisado perturbam o fluxo de calor imposto, produzindo padrões de temperatura superficial mensuráveis, que permitem a sua identificação no termograma (imagem térmica) obtida.

Existem várias técnicas activas que se podem utilizar de forma a impor artificialmente um fluxo de calor ao objecto. A figura 3.3 apresenta algumas das principais técnicas [MADALGUE, 2001a].

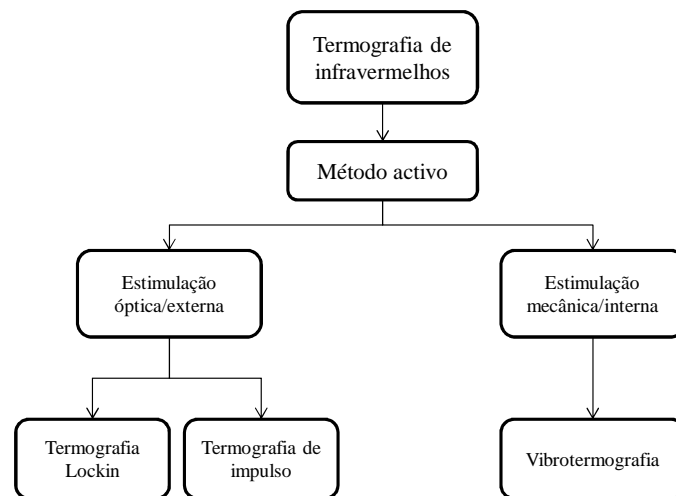


Fig. 3.3: Métodos activos de Termografia de infravermelhos [MADALGUE, 2001a]

Na campanha experimental em laboratório do presente trabalho, recorreu-se a um método activo. Este método consistiu na estimulação externa do objecto analisado (provetes), usando-se para esse efeito, uma placa de aquecimento. A placa é constituída por uma chapa de alumínio, uma resistência eléctrica e uma placa de material isolante (figura 3.4), que permitirá aquecer o elemento em análise por condução (placa em contacto com elemento) ou por radiação (placa afastada do elemento).



Fig. 3.4: Placa de aquecimento

Para a campanha experimental desenvolvida no exterior (secção 5.3), recorreu-se ao aquecimento da célula experimental em análise, por acção natural da irradiação solar.

3.2.3 Método passivo

No método passivo não é imposto nenhum aquecimento de origem externa ao elemento; em vez disso utiliza-se a diferença de temperatura existente entre os ambientes interior e exterior, a qual dá origem a um fluxo térmico através da envolvente. A intensidade deste fluxo é proporcional à diferença de temperatura entre ambientes (normalmente recomenda-se que seja superior a 10 °C) e à resistência térmica dessa envolvente [MATIAS, 2004].

A adopção do método passivo, permite monitorizar, as diferenças de temperatura do elemento em análise, determinando-se o estado em que se encontra. A possibilidade de operar à distância e obtenção de medições em tempo real representam uma mais valia para este tipo de utilização. As aplicações mais

usuais para este tipo de técnica são: monitorização de processo e produto; manutenção preventiva e aplicações não industriais como no ramo da Medicina e Militar [MADALGUE, 2001a].

3.2.4 Interpretação das termografias

A interpretação dos resultados obtidos na termografia não é uma tarefa fácil, sendo a correcta aplicação dos termogramas indispensável para o investigador atingir os objectivos a que se propõe. A câmara termográfica regista a variação de temperatura em função, da natural constituição do elemento, assim como, da variação da fonte de irradiação da superfície em estudo. A alteração da temperatura superficial pode ter várias origens, seja devido a radiação solar directa, reflectida de outras superfícies, fontes de calor próximas ou mesmo devido à mudança das condições climáticas.

Mas a variação de temperatura registada pela câmara termográfica não implica, que esta se deva exclusivamente à maior ou menor irradiação da superfície. Quando na mesma superfície existem materiais diferentes, estes apresentam propriedades térmicas, emitância e reflectância diferentes, originando valores de temperatura que não correspondem à temperatura real da superfície. Por esta razão é necessário configurar a câmara termográfica de forma a garantir que a temperatura medida corresponde à temperatura real.

A interpretação das termografias depende também, da abordagem adoptada, cuja escolha deve depender do objectivo da inspecção termográfica. A análise termográfica pode ser dividida em dois tipos: análise qualitativa e análise quantitativa.

Análise qualitativa

Este tipo de análise pretende apenas avaliar, a nível qualitativo, o objecto analisado. A análise qualitativa é ideal, por exemplo, para situações onde se pretenda localizar problemas no isolamento térmico, tubagens e pormenores construtivos que não sejam visíveis a olho nu. É evidente que a câmara devolve na mesma a temperatura do local observado, cingindo-se a análise, à comparação de padrões de temperatura.

Utilizando este tipo de análise, a interpretação da imagem termográfica baseia-se na avaliação comparativa das imagens obtidas e na identificação visual de eventuais problemas, *in situ*, e em tempo real. A abordagem é simples e objectiva, tendo como objectivo a identificação e não a quantificação do problema.

Análise quantitativa

A análise quantitativa difere da anterior, visto implicar uma quantificação precisa da temperatura superficial ou da distribuição desta. A avaliação que é efectuada nesta abordagem implica a correcta configuração da câmara termográfica, isto é, tem em consideração pequenas variações causadas por alterações nas propriedades dos materiais, condições atmosféricas, entre outros. Toda a informação colectada é processada num software adequado e analisada posteriormente. Desta forma, garante-se uma análise termográfica completa e fiável, permitindo determinar a temperatura real da superfície.

3.3 Recomendações práticas de uma inspecção

Uma inspecção termográfica pode ser conduzida pelo interior ou pelo exterior de um edifício em que o método escolhido depende, principalmente, do que se pretende avaliar mas também das condições

meteorológicas existentes. Efectuar termografias pelo interior é um método comum, visto ser mais fácil detectar as variações de temperatura na superfície, contribuindo para este facto, condições meteorológicas mais favoráveis à inspecção. Existe frequentemente a tendência para investigar a anomalia e não a causa (origem), analisando pelo interior onde esta se manifesta e não onde pode existir a causa, no exterior.

No presente estudo, desenvolveram-se várias inspecções termográficas na célula experimental C5 (vd secção 4.3.3), durante a estação de arrefecimento. Utilizando o aquecimento natural da fachada resultante da incidência da radiação solar (método activo), efectuou-se a análise pelo exterior pelo facto de se pretender avaliar o comportamento de tintas reflectantes aplicadas em paramentos exteriores de células experimentais (secção 4.3.1).

O trabalho desenvolvido permitiu perceber que, apesar da aparente simplicidade da termografia, a análise dos termogramas não é fácil porque existem vários factores que influenciam os resultados. Para facilitar a compreensão dos termogramas e evitar diagnósticos errados apresenta-se de seguida, um guia prático de inspecção baseado na experiência adquirida.

3.3.1 Guia prático de utilização

Descrição Geral

- Tentar determinar as condições gerais do edifício; tipo de construção e dos materiais existentes

As diferenças relativas entre as temperaturas registadas em diferentes pontos da superfície de um objecto resultam, em parte, das diferentes resistência e capacidade térmica que apresentam os elementos que a constituem.

Exemplo prático: se o material constituinte for betão a variação de temperatura é lenta; se for um metal muda de temperatura rapidamente.

- Determinar as condições meteorológicas e avaliar se permitem obter bons resultados

Utilizando o método passivo, aconselha-se que na altura da inspecção: exista pelo menos 10 ° C de diferença de temperatura estável entre os dois lados da parede. Independentemente do método, a velocidade do vento deve ser reduzida e evitar períodos de precipitação durante a inspecção.

Exemplo prático: se durante a inspecção, se verificar vento forte, poderão ocorrer variações da temperatura superficial muito rápidas, que induzem erros na interpretação da termografia e, consequente, no diagnóstico.

Procedimento

Obtido o panorama geral das condições do edifício ao nível da sua construção, situação actual e condições meteorológicas procede-se então à inspecção. Opta-se por um método: activo ou passivo. É importante salientar que o método escolhido depende da avaliação que o técnico faz da situação encontrada. Abaixo apresentam-se recomendações para o procedimento termográfico e cuidados a ter numa inspecção termográfica pelo exterior:

- Manter a câmara termográfica perpendicular ao objecto, se possível usar um tripé.
- Manter a câmara nivelada e evitar ângulos com a perpendicular à superfície em análise superiores a 60 °.

- Evitar efectuar medições a distâncias superiores a 10 m.
- Não permitir que a radiação solar atinga directamente a lente da câmara.
- Evitar a reemissão de radiação para o objecto em análise (ex:albedo).
- Calibrar a câmara consoante as condições encontradas.
- Focar as imagens térmica e real.
- 1ª termografia obtida em modo automático, obtendo-se uma panorâmica geral.
- 2ª termografia obtida em modo manual, estreitando a gama de temperaturas.
- Definir um intervalo/gama de temperaturas.
- Estreitando o intervalo de temperatura, melhora-se a percepção das anomalias, o que se traduz numa melhor “resolução” da imagem térmica.

3.3.2 Exemplos práticos de aplicação

A utilidade da técnica termográfica traduz-se na capacidade de visualização e análise de possíveis perdas ou ganhos de calor do edifício, conferindo ao investigador uma ferramenta rápida e prática na identificação de zonas críticas na envolvente. A Termografia pode ser aplicada como ferramenta principal de ensaio, ou como auxiliar, servindo de guia para a aplicação de outros ensaios (desde a colocação de instrumentos à detecção de zonas a ensaiar). A análise exterior do edifício torna-se especialmente benéfica para detectar anomalias em coberturas, defeitos no isolamento térmico ou detectar fugas de ar através da envolvente opaca e das janelas.

Seguidamente apresentam-se alguns exemplos de aplicação em que a Termografia pode ser útil, principalmente relacionados com a qualidade térmica de edifícios.

Consumo energético de edifícios

Os ganhos e perdas térmicas de um edifício podem ser identificadas e analisadas pela técnica termográfica. A identificação de eventuais problemas, que conduzam a um desequilíbrio no balanço energético e, consequentemente, no consumo energético do edifício, revela ser uma das grandes mais valias da Termografia. Inclusive, a manutenção de um edifício é amplamente facilitada, quando atempadamente são delimitadas zonas problemáticas, evitando-se desta forma uma degradação precoce do elemento construtivo [FLIR, 2007].

Muitos dos sistemas e materiais usados em edifícios, têm como função otimizar o conforto térmico e consumo de energia. A Termografia revela ser uma ferramenta útil na monitorização do desempenho das soluções adoptadas, quantificando não só a sua eficácia mas também a sua longevidade (identificando eventuais anomalias).

A Termografia pode ser amplamente aplicada aos mais diversos campos, apresentando-se como uma ferramenta de diagnóstico, manutenção e controlo de qualidade. O diagnóstico apenas poderá ser efectuado depois de detectada a anomalia, sendo apresentados abaixo alguns exemplos.

Detecção de infiltrações ou exfiltrações de ar

A detecção de infiltrações ou exfiltrações de ar usando a Termografia baseia-se na observação de zonas com temperatura mais baixa ou mais alta (consoante os casos) nas imediações de um ponto. Por exemplo, é possível identificar os padrões característicos que se formam quando o ar mais frio passa pelo ponto de fuga na envolvente e contacta com a superfície, arrefecendo-a (figura 3.5). Este tipo de problemas obriga o sistema de ventilação a consumir mais energia, conduzindo a um consumo global de energia mais elevado.

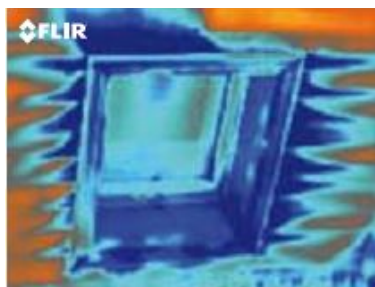


Fig. 3.5: Termografia de zona com infiltração de ar entre o tecto e a janela adaptado de [FLIR, 2007]

A figura 3.6 apresenta a situação inversa, em que ocorre fuga de ar do interior para o exterior da cobertura.

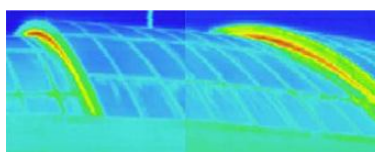


Fig. 3.6: Termografia de zona com exfiltração de ar (zona vermelha) na cobertura de um piscina adaptado de [MATIAS, 2014]

Detecção de defeitos no isolamento térmico

A termografia também pode ser aplicada na detecção de defeitos no isolamento térmico de um edifício. O maior ou menor desempenho do isolamento térmico, ou mesmo a falta deste, é avaliado pela variação da temperatura superficial observada. Por exemplo, aquando de uma inspecção pelo interior, em período de Inverno, áreas com menor isolamento térmico surgiram mais frias do que as superfícies interiores em seu redor (figura 3.7).

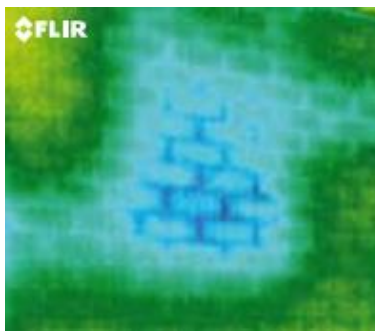


Fig. 3.7: Termografia (pelo interior) de zona com falta de isolamento térmico na parede adaptado de [FLIR, 2007]

Tal como referido anteriormente, a interpretação dos termogramas requer alguns cuidados, especialmente quando as inspecções são realizadas pelo exterior (figura 3.8).

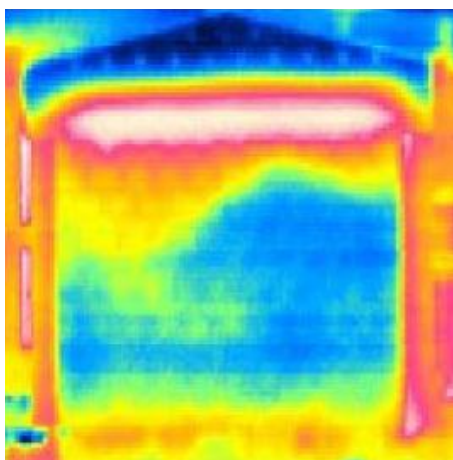


Fig. 3.8: Termografia (pelo exterior) de parede com falta de isolamento térmico adaptado de [MATIAS, 2014]

Na figura acima é visível a perda de calor (zona amarela) que ocorre através da parede, do interior para o exterior, devido à falta de isolamento térmico. A termografia apresentada na figura 3.8 foi efectuada no período de Inverno. As diferentes temperaturas evidenciadas pela superfície do elemento podem ser devidas não só a possíveis defeitos no isolamento térmico mas também às diferentes propriedades térmicas dos materiais, cor, reflectância, emitância e acção dos agentes climáticos (radiação solar, vento).

Deteção de humidade

Zonas com humidade também podem ser detectadas pela câmara termográfica. Estas zonas humedecidas são identificadas na termografia devido ao processo de evaporação (figura 3.9).

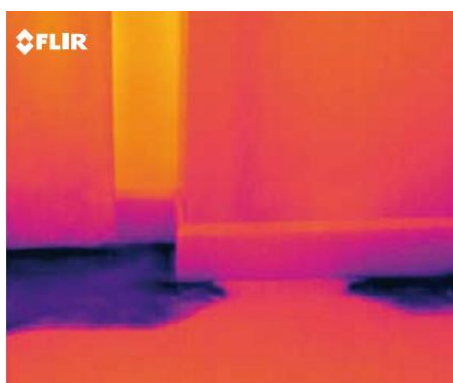


Fig. 3.9: Termografia de zona do pavimento humedecida adaptado de [FLIR, 2007]

A evaporação de água, provoca uma redução da temperatura da superfície molhada, criando um fluxo visível com a termografia (figura 3.10).

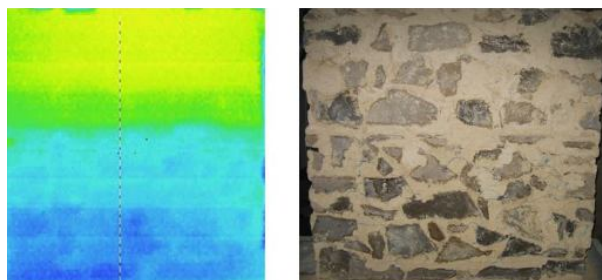


Fig. 3.10: Termografia (esq.) e imagem real (dir.), de parede de alvenaria humedecida adaptado de [MATIAS, 2014]

Detecção de pontes térmicas

A existência de pontes térmicas na envolvente dos edifícios está na origem de diversas anomalias frequentemente detectadas. Por exemplo, em condições de Inverno, dão origem a um acréscimo de perda térmica para o exterior (figura 3.11).

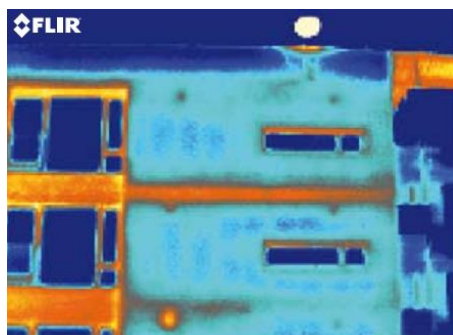


Fig. 3.11: Termografia de ponte térmica num piso adaptado de [FLIR, 2007]

A esta perda térmica é acrescido o risco de ocorrência de condensações superficiais, verificando-se, muito frequentemente, o desenvolvimento de bolors nestas zonas.

Como a ponte térmica corresponde a uma área com menor isolamento devido ao tipo de construção, o calor irá fluir para o exterior (do espaço aquecido), pelo caminho de menor resistência térmica. A diferença de temperatura superficial devido a este fenómeno é detectada pela câmara de infravermelhos (figura 3.12).

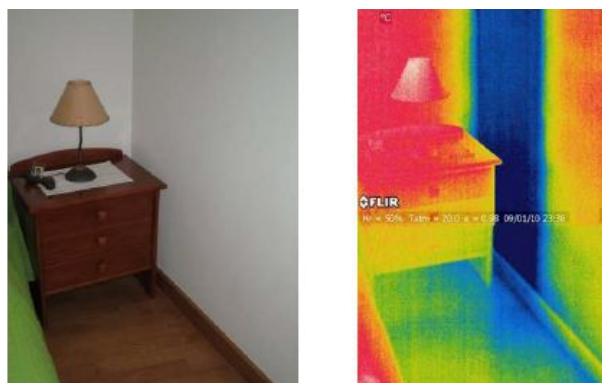


Fig. 3.12: Termografia (esq.) de ponte térmica (pilar) e correspondente imagem real (dir.) adaptado de [MATIAS, 2014]

Capítulo 4

Avaliação do desempenho térmico de tintas reflectantes

4.1 Introdução

Actualmente tintas e revestimentos por pintura revestem praticamente tudo o que usamos diariamente, desde electrodomésticos, edifícios, carros, barcos, aviões ou computadores. O avanço tecnológico deu origem a tintas cada vez mais complexas e hoje, os revestimentos por pintura não só protegem e embelezam os substratos como também lhes conferem propriedades funcionais: antiderrapantes, isoladoras, condutoras e, em particular, reflectoras [APT, 2014].

A tinta contribui para a durabilidade dos objectos, apresentando-se como a primeira protecção da superfície, à semelhança da pele nos humanos. Além da protecção, a tinta confere ao objecto funcionalidades tais como, visibilidade, de limpeza, protecção térmica ou simplesmente estéticas.

Para avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes foi necessário, primeiramente, caracterizá-las relativamente às suas propriedades radiativas: reflectância e emitância. Esta avaliação é efectuada em condições controladas de laboratório, determinando-se igualmente o desempenho térmico por análise termográfica. Avaliado o desempenho térmico em condições controladas, procedeu-se ao mesmo exercício em condições reais de exposição.

4.1.1 Composição da tinta

Uma tinta pode ser definida como uma mistura pigmentada, sendo a composição genérica de uma tinta composta por quatro grandes famílias de constituintes [APT, 2014]:

- **Ligante** - Substância que constitui o veículo fixo (uma ou mais resinas) e é responsável pelas principais propriedades do revestimento. As tintas são classificadas de acordo com a natureza química do ligante, que é o constituinte mais importante.
- **Solventes e diluentes** - Constituem o veículo volátil; os solventes (eventualmente água) dissolvem a resina, enquanto os diluentes reduzem a viscosidade da tinta a um nível adequado para a sua aplicação.
- **Aditivos** - São materiais normalmente adicionados em pequenas quantidades, com o objectivo de controlar uma ou mais das propriedades da tinta.

- Matérias pulverulentas - Poderão ser pigmentos e cargas.

Os pigmentos conferem a cor e opacidade à tinta e podem influenciar muitas das suas propriedades, nomeadamente a durabilidade, resistência à corrosão, ao fogo, à luz entre outras. As cargas tem como finalidade alterar algumas das propriedades das tintas, desempenhando um papel importante ao nível do controlo do brilho, da dureza, resistência à riscagem, permeabilidade e aderência. O ligante, ou veículo fixo, é responsável pela formação da película sólida da tinta e pela aderência desta ao substrato. O veículo volátil tem como principal finalidade a dissolução do veículo fixo, de forma a obter características reológicas adequadas à aplicação [DORNELLES, 2008]. A proporção entre cada um dos constituintes da tinta depende da finalidade a que se destina e do custo associado.

Tinta reflectante

A tinta termo-reflectora ou reflectante foi desenvolvida no intuito de minimizar os ganhos térmicos dos edifícios, principalmente pelas coberturas. O objectivo deste tipo de soluções é o de contribuir para uma melhor qualidade energética dos edifícios, reduzir os seus consumos de energia e as correspondentes emissões de gases. A utilização de tintas reflectantes surge como uma solução rápida e fácil de aplicar, possibilitando o controlo do fluxo de calor para o interior e proporcionando níveis de conforto térmico aceitáveis para os ocupantes, principalmente em período de Verão.

A diferenciação entre uma tinta reflectante e uma convencional resulta basicamente da integração de microesferas e/ou pigmentos especiais, que permite aumentar a reflexão da radiação. Estes pigmentos são normalmente designados de *cool pigments* e apresentam elevada reflectância na gama infravermelha da radiação solar.

Segundo LEVINSON *et al.* (2005), para se obter um revestimento de elevado desempenho térmico como a tinta reflectante em estudo, este deve possuir baixa transmitância na zona visível do espectro solar, de modo a esconder as camadas de suporte, e baixa absorptância na zona dos infravermelhos próximos, minimizando os ganhos de calor.

Como grande parte da radiação emitida pelo Sol (figura 2.3) corresponde a comprimentos de onda da gama infravermelha, torna-se prioritário desenvolver soluções que minimizem a absorção deste tipo de radiação, e consequentemente, atenuem o fluxo de calor para o interior do edifício. Assim sendo, desenvolveram-se pigmentos que podem ser adicionados a uma tinta e que possibilitam um aumento da reflectância na região do infravermelho do espectro de radiação solar. Estes pigmentos podem apresentar-se sob duas formas [DIAS, 2008]:

- Pigmentos reflectores da radiação infravermelha, os mais vulgarmente utilizados.
- Pigmentos transparentes aos infravermelhos que devem ser aplicados sobre um primário reflector, ou seja, a radiação infravermelha atravessa a película de tinta com o pigmento transparente e é reflectida pelo primário onde esta está aplicada.

Os pigmentos são compostos orgânicos ou inorgânicos, e são praticamente insolúveis no meio em que são incorporados. Fisicamente os pigmentos influenciam a propagação da luz; a forma como a direcção de propagação é alterada, depende da dimensão do pigmento face ao comprimento de onda incidente, da diferença entre os índices de refacção do pigmento e do meio onde se encontra (substrato) e da direcção da radiação incidente [LEVINSON *et al.*, 2007].

Se o pigmento incorporado for constituído por partículas de grandes dimensões, relativamente ao comprimento de onda da radiação incidente, esta será reflectida e refractada, obedecendo às leis da óptica. Mas se este tiver dimensões da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação incidente, a radiação é dispersa em várias direcções (difusão) em função da dimensão, do índice de refração relativa e da absorvância do pigmento. Por último, se a dimensão for muito pequena relativamente ao comprimento de onda da radiação incidente, a direcção da propagação não é alterada.

Tal como foi referido anteriormente, os pigmentos são compostos orgânicos ou inorgânicos. Os mais utilizados pela indústria são do tipo inorgânico. A dimensão das partículas dos pigmentos inorgânicos, como o dióxido de titânio, o carbono preto e os óxidos de ferro, é relativamente extensa, combinando-se diferentes classes de dimensões de modo a obter as características pretendidas. A contribuição de cada um destes processos (reflexão, dispersão e absorção), no comportamento do sistema de revestimento vai depender do pigmento, da sua concentração, do meio onde ele foi disperso e do elemento de suporte [HERBST & HUNGER, 2004].

Em suma, um sistema de pintura reflectante no infravermelho próximo terá um bom desempenho térmico de Verão quando sujeito a radiação solar, independentemente da base em que for aplicado, enquanto que uma tinta transmissora em infravermelho próximo, requer uma superfície de base reflectante nestes comprimentos de onda, para formar um conjunto "primário reflector + tinta" no infravermelho próximo.

4.2 Condições laboratoriais

A campanha experimental desenvolvida em laboratório tem como objectivo determinar a reflectância total e direcciona de tintas reflectantes e convencionais de diferentes cores. Igualmente pretende-se determinar a emitância, assim como o desempenho térmico dos provetes quando sujeitos a ciclos de aquecimento/arrefecimento.

4.2.1 Reflectância

A aplicação correcta do método termográfico e a determinação das suas potencialidades depende do conhecimento adquirido sobre as características das tintas em estudo, ao nível da sua reflectância e emitância. Os revestimentos de elevada reflectância, como as tintas reflectantes em estudo, tendem a manter as superfícies onde são aplicados e espaços interiores adjacentes com temperaturas mais baixas, quando comparadas com as temperaturas atingidas em envoltórios com revestimentos convencionais.

O esquema da figura 4.1 apresenta os ensaios realizados de forma a caracterizar a reflectância dos diferentes tipos de tintas em estudo.

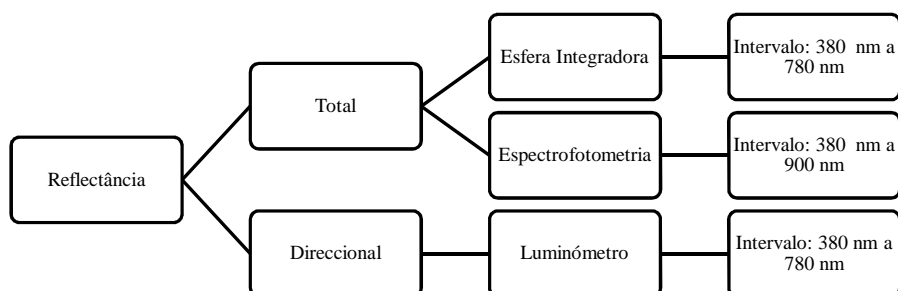


Fig. 4.1: Esquema de ensaios para a obtenção da reflectância

Os ensaios efectuados têm como objectivo avaliar a selectividade espectral de tintas reflectantes, revelada pela bibliografia consultada. Assim sendo, a reflectância total é avaliada para dois intervalos de comprimento de onda: 380 a 780 nm e 380 a 900 nm. Desta forma, é abrangida a região do visível (VIS) e parte do infravermelho próximo (NIR). Posteriormente, os resultados obtidos são complementados com dados do ensaio de espectrofotometria realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), descrito na secção 5.2.1, para o espectro completo da radiação solar (exceptuando UV). Outro factor avaliado na campanha laboratorial foi o ângulo de incidência da luz, determinando-se a selectividade angular para as diferentes tintas (reflectantes e convencionais).

Espectrofotometria

O processo utilizado na determinação da reflectância total foi baseado na norma ASTM E 903 [ASTM, 2012a] definida para a medição da absorptância, reflectância e transmitância espectrais de materiais, usando espectrofotómetros equipados com esferas integradoras. O ensaio foi realizado no Núcleo de Materiais Orgânicos (NMO) do Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), utilizando o equipamento *Hitachi U3300 (UV/VIS/NIR)* adequado para este ensaio (figura 4.2).



Fig. 4.2: Espectrofotómetro *Hitachi U3300* com esfera integradora

Na figura 4.2 é possível observar a esfera integradora acoplada ao espectrofótopmetro. A esfera integradora de 150 mm de diâmetro permite medir a reflectância de amostras sólidas. A parede interior da esfera é revestida por uma tinta branca altamente reflectiva (sulfato de bário). O funcionamento do conjunto espectrofótopmetro-esfera processa-se da seguinte forma: o feixe de luz que entra na esfera é reflectido múltiplas vezes na sua parede interior até atingir o detector. O revestimento interior em sulfato de bário oferece mais de 97% de reflectância ao longo de uma larga faixa espectral, sempre próximo da difusão perfeita [HITACHI, 1991].

Materiais

Os provetes utilizados neste ensaio e nos subsequentes foram concebidos com o objectivo de reproduzir superfícies reais das envolventes dos edifícios. A partir de blocos de maiores dimensões criaram-se vários provetes de superfície rugosa do tipo ETICS. De chapas metálicas criaram-se provetes de superfície lisa, obtendo-se extremos possíveis das superfícies de materiais de construção correntes.

Os provetes identificados pelo número 1 correspondem a uma superfície rugosa do tipo ETICS e pelo número 2 correspondem a uma superfície lisa, neste caso, uma chapa metálica (figuras 4.3 e 4.4).

Em todos os provetes do tipo 1 foram aplicadas duas demãos como indicado na ficha técnica do produto:

- 1ª demão - tinta diluída até 5% com água
- 2ª demão - tinta à viscosidade de fornecimento

Relativamente aos provetes do tipo 2 aplicou-se uma demão de primário anti-corrosão visto o suporte ser em chapa metálica, usando o mesmo procedimento de aplicação de tinta dos provetes do tipo 1.



Fig. 4.3: Provetes do tipo ETICS antes de aplicado o sistema de pintura



Fig. 4.4: Provetes metálicos antes de aplicado o primário e o sistema de pintura

Os provetes identificados com a letra “N” (por exemplo: BrN) correspondem a provetes pintados com uma tinta convencional, enquanto que os que apresentam a letra “T” (por exemplo : BrT) foram pintados com uma tinta reflectante.

O provete BrPr corresponde a um provete com a base pintada em preto reflectante e uma segunda demão em branco reflectante. Criou-se apenas provetes BrPr rugosos (tipo 1) porque pretende-se unicamente aferir a influência da cor da base no desempenho reflectivo, independentemente do tipo de superfície.

O provete BrR corresponde a um revestimento térmico especial cuja reflectância também foi avaliada, visto ser um tipo de acabamento diferente da tinta. Depois de aplicado apresenta uma superfície que não é totalmente lisa e que é de maior espessura.

Abaixo apresentam-se os três tipos de provetes ensaiados de superfície rugosa, resumidos no quadro 4.1:

- Provetes tipo ETICS pintados com tinta convencional e reflectante; cores preta, telha, branco e cinza; secção 9 x 9 cm.
- Provetes tipo ETICS pintados com um revestimento térmico especial; cor branca; secção 9 x 9 cm.
- Provetes tipo ETICS pintados com tinta reflectante, base de cor preta e superfície branca; secção 9 x 9 cm

Quadro 4.1: Provetes de superfície rugosa (tipo 1)

Nomenclatura		Cor	Marca
BrN	BrN1a	Branco convencional	CIN
	BrN1b		
BrT	BrT1a	Branco reflectante	CIN
	BrT1b		
BrR	BrR1a	Revestimento térmico branco	Re-Therm
	BrR1b		
PrN	PrN1a	Preto convencional	CIN
	PrN1b		
PrT	PrT1a	Preto reflectante	CIN
	PrT1b		
TeT	TeT1a	Telha reflectante	CIN
	TeT1b		
TeN	TeN1a	Telha convencional	CIN
	TeN1b		
CinT	CinT1a	Cinzento reflectante	CIN
	CinT1b		
BrPr	BrPr1a	Base: Preto reflectante	CIN
	BrPr1b	Superfície: Branco Reflectante	

Os provetes foram cortados no tamanho aproximado de 9 cm por 9 cm pois este formato adequa-se não só ao suporte do espectrofotómetro, mas também ao suporte de outros equipamentos usados no ensaio da esfera integradora e reflectância direcciona (secção 4.2.1).

A escolha do material do suporte (ETICS e chapa metálica) pretende reproduzir a aplicação prática e real deste tipo de tintas em materiais de construção correntes, avaliando o seu comportamento reflectivo em condições controladas de laboratório mas na “versão final” de aplicação.

Houve a necessidade de, para cada cor, existirem dois provetes rugosos: *a* e *b*. A criação de dois provetes da mesma cor garante um grupo de resultados mais extenso e permite efectuar ensaios diferentes ao mesmo tempo. Para este ensaio recorreu-se apenas aos provetes *b*, enquanto que os provetes *a* foram utilizados no ensaio de determinação da emitância (secção 4.2.2).

Na figura 4.5 é possível observar as diferentes cores e texturas dos provetes de superfície rugosa ensaiados.

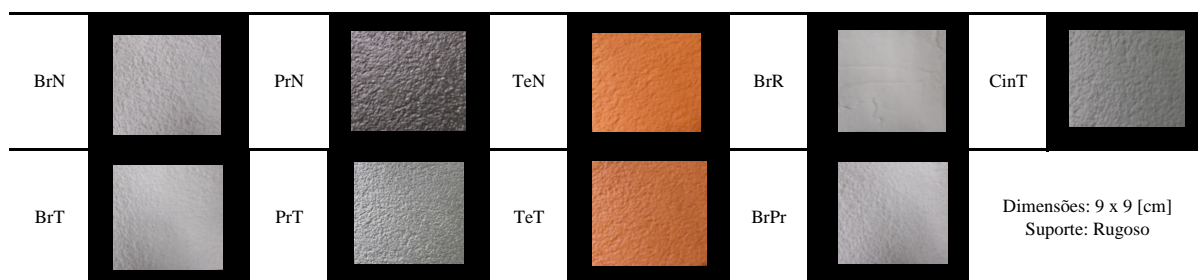


Fig. 4.5: Pormenor dos provetes rugosos ensaiados

As mesmas tintas foram aplicadas num suporte diferente (chapa metálica), obtendo-se uma superfície lisa, no intuito de avaliar a possível influência que o tipo de superfície tem na reflectância de um material.

De seguida, apresentam-se os três tipos de provetes ensaiados de superfície lisa, resumidos no quadro 4.2:

- Provetes em chapa metálica pintados com tinta convencional e reflectante; cores preta, telha, branco e cinza; secção 10 x 9 cm.
- Provetes em chapa metálica pintados com um revestimento térmico especial; cor branca; secção 10 x 9 cm.

Quadro 4.2: Provetes de superfície lisa (tipo 2)

Nomenclatura		Cor	Marca
BrN	BrN2	Branco convencional	CIN
BrT	BrT2	Branco reflectante	CIN
BrR	BrR2	Revestimento térmico branco	Re-Therm
PrT	PrT2	Preto reflectante	CIN
TeT	TeT2	Telha reflectante	CIN
TeN	TeN2	Telha convencional	CIN
CinT	CinT2	Cinzento reflectante	CIN

Metodologia

Para garantir a repetibilidade de ensaio e a fiabilidade dos resultados obtidos pelo espectrofotómetro *Hitachi U3300*, cada provete foi ensaiado duas vezes consecutivas. Não se verificaram alterações entre a 1ª e 2ª leitura, optando-se por utilizar os valores obtidos na 1ª leitura em vez de uma média, visto serem praticamente idênticos.

As especificações introduzidas para leitura e utilização eficiente do espectrofotómetro foram as seguintes:

- Modo de leitura - reflectância espectral.
- Intervalo espectral - 380 nm a 900 nm.
- Velocidade de varrimento - 300 nm/min.
- Passo de resolução - 2 nm.

Antes de realizar as leituras foi necessário efectuar a calibração do equipamento. A calibração consistia em configurar o equipamento com os itens referidos acima e determinar uma “baseline” ou patamar de referência, obtido a partir da leitura do padrão. O padrão consistia numa placa difusa branca em óxido de alumínio que é colocada na armadilha de luz, juntamente com os provetes a ensaiar (figura 4.6). Com a “baseline” definida obtém-se a reflectância total dos provetes, tendo em conta o padrão.



Fig. 4.6: Pormenor da armadilha de luz

O espectrofómeto consiste numa fonte de luz (duas lâmpadas), monocromadores, células de referência e detectores. Neste caso uma lâmpada emite radiação ultravioleta e a segunda lâmpada emite radiação visível e infravermelha até aos 1100 nm.

Numa primeira fase avaliou-se a reflectância total no intervalo de comprimento de onda de 180 a 1100 nm, englobando assim o UV/VIS/NIR, explorando os limites do equipamento, averiguando a capacidade do equipamento em obter medições fiáveis. Verificou-se que o equipamento tinha dificuldade em conseguir produzir espectros de reflectância de qualidade porque nos extremos do intervalo apresentava muito ruído. Limitou-se então, o intervalo para 380 a 900 nm, evitando-se os comprimentos de onda para os quais o equipamento apresentava dificuldades. O intervalo de comprimento de onda medido permite avaliar a variação da reflectância em parte da gama de comprimentos de onda da radiação solar, visto incluir a região do visível (VIS) e parte do infravermelho próximo (NIR).

Posteriormente, os dados obtidos neste ensaio serão comparados e complementados por resultados experimentais obtidos pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), no âmbito de projecto promovido pela CIN [FEUP, 2013]. Nesse ensaio efectuou-se a análise espectrofotométrica da mesma tinta reflectante nas três cores (preto, branco e telha) no intervalo de comprimento de onda correspondente à maioria da radiação solar - 386 a 2131 nm (VIS e NIR). Desta forma é possível avaliar os intervalos mais relevantes para este estudo, correspondentes à região do visível e infravermelho-próximo, visto serem estes os comprimentos de onda para os quais as tintas reflectantes apresentam melhores resultados (secção 5.2.1).

É de salientar que os resultados obtidos pela FEUP não podem ser comparados de forma directa com os obtidos neste trabalho porque se tratam de provetes e superfícies diferentes, ensaiados em equipamentos diferentes. O que foi referido anteriormente não invalida que seja possível ratificar os resultados obtidos neste trabalho e observar a variação da reflectância ao longo do intervalo espectral da radiação solar deste tipo de tinta (reflectante).

A avaliação da capacidade reflectante das várias tintas em estudo foi conseguida em laboratório, realizando-se mais dois ensaios:

- variação da reflectância consoante o ângulo de incidência/observação ou reflectância direcciona;
- medição da reflectância total usando uma esfera integradora *LMT RT500*.

Os ensaios realizaram-se no Laboratório de Fotometria e Colorimetria do Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Esfera integradora

O método de avaliação da reflectância total de tintas reflectantes e convencionais consiste na leitura directa da reflectância total obtida da esfera integradora *LMT RT500* (figura 4.7). A gama de comprimento de onda avaliada corresponde ao intervalo espectral de 380 a 780 nm.

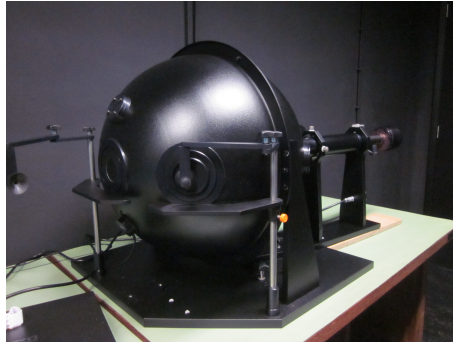


Fig. 4.7: Esfera integradora *LMT RT500*

A parede interior da esfera é revestida por uma pintura com características de reflectância difusa e reflectância espectral $\rho(\lambda) \approx 0,8$, praticamente independente do comprimento de onda [LMT]. A esfera integradora possui seis aberturas, que são utilizadas consoante o tipo de medição pretendido.

No esquema da figura 4.8 apresenta-se o posicionamento das aberturas, nas quais se coloca o provete a ensaiar, fonte de iluminação e padrão. A fonte de iluminação usada no ensaio é constituída por uma lâmpada incandescente de halogéneo 6V/10W (OSRAM 64 225). A luz produzida pela fonte de iluminação corresponde à faixa espectral do visível, avaliando-se a reflectância total dentro desta região do espectro electromagnético.

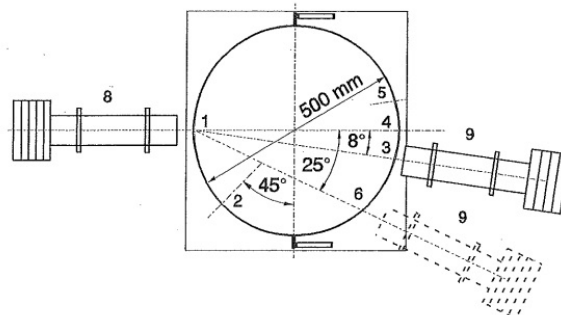


Fig. 4.8: Demonstração esquemática dos componentes adaptado de [LMT]

Materiais

Os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos do ensaio de espectrofotometria (secção 4.2.1), garantindo uma caracterização mais abrangente e fiável das propriedades das tintas em estudo. Tal como já foi referido, os provetes identificados pelo número 1 correspondem a uma superfície rugosa do tipo ETICS e os com número 2 correspondem a uma superfície lisa, neste caso uma chapa metálica. Os quadros 4.1 e 4.2 apresentam os provetes correspondentes aos dois tipos de superfície avaliados no ensaio.

Metodologia

Para a medição da reflectância total, a fonte de iluminação é posicionada na abertura 3. As aberturas 4, 5 e 6 são fechadas. O raio de luz que incide na abertura 1 com um ângulo de 8° deve ser ajustado para o centro da abertura (figura 4.9).

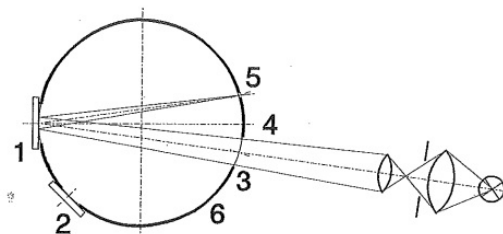


Fig. 4.9: Medição da reflectância total adaptado de [LMT]

No interior da esfera existe um detector sensível à luz (fotómetro) que mede a intensidade da luz e encontra-se ligado à consola de medição (*RT500*). A fonte de iluminação e consola de medição são ligadas com pelo menos 15 minutos de antecedência, permitindo o aquecimento da lâmpada.

Primeiramente é colocado na abertura 1 o padrão de reflectância e medida a sua reflectância, que deve ter o valor de 88,7 %. Calibrada a consola de medição com o valor padrão, procede-se à medição dos provetes a ensaiar, substituindo o padrão pelo provete na abertura 1. Os valores são obtidos directamente da consola de medição.

O procedimento de ensaio é aplicado continuamente, sendo que primeiramente se ensaiaram os provetes do tipo 1 e depois os do tipo 2. Entre as medições dos dois tipos de provete efectuou-se nova calibração, garantindo que o valor padrão se mantinha inalterado.

Reflectância direcciona

Para uma melhor caracterização da reflectância dos vários tipos de tintas aplicadas em provetes de superfície rugosa e lisa foi realizado o ensaio de variação da reflectância consoante o ângulo de incidência/observação, recorrendo a um luminómetro, um goniómetro e uma lâmpada *Osram Halospot 48 20 W*, conforme apresentado na figura 4.10.



Fig. 4.10: Equipamentos utilizados no ensaio de reflectância direcciona

Na figura 4.10 observa-se o conjunto de equipamentos que permitem executar o ensaio, utilizando um luminómetro portátil *Minolta Chroma Meter CS-100*. A sua função é medir a luminância do provete em estudo quando este é iluminado pela luz proveniente da lâmpada *Osram Halospot 48 20 W*, simulando a região espectral da radiação visível. O goniómetro permite colocar a amostra perpendicular ao observador (luminómetro) ou perpendicular à fonte de iluminação, ao mesmo tempo que varia o ângulo entre a fonte luminosa e o luminómetro.

Cada provete foi ensaiado nos seguintes ângulos: 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 75° . Para cada ângulo, foi efectuada a medição quando o provete é perpendicular à fonte luminosa e quando este é perpendicular ao observador (luminómetro), mantendo-se sempre a mesma distância (raio) entre o luminómetro e o provete. Este ensaio permite determinar a influência que o ângulo de incidência da luz e o tipo de superfície (liso ou rugoso) têm no comportamento reflectivo da tinta.

O esquema abaixo (figura 4.11) exemplifica para o ângulo de 45° , como decorre o ensaio. A posição da fonte de iluminação é fixa, movendo-se apenas o luminómetro e o goniómetro de acordo com o ângulo pretendido. Desta forma garante-se a estabilidade da lâmpada, impedindo possíveis flutuações da corrente eléctrica, que afectem a iluminação dos provetes e, consequentemente, a fiabilidade dos resultados obtidos.

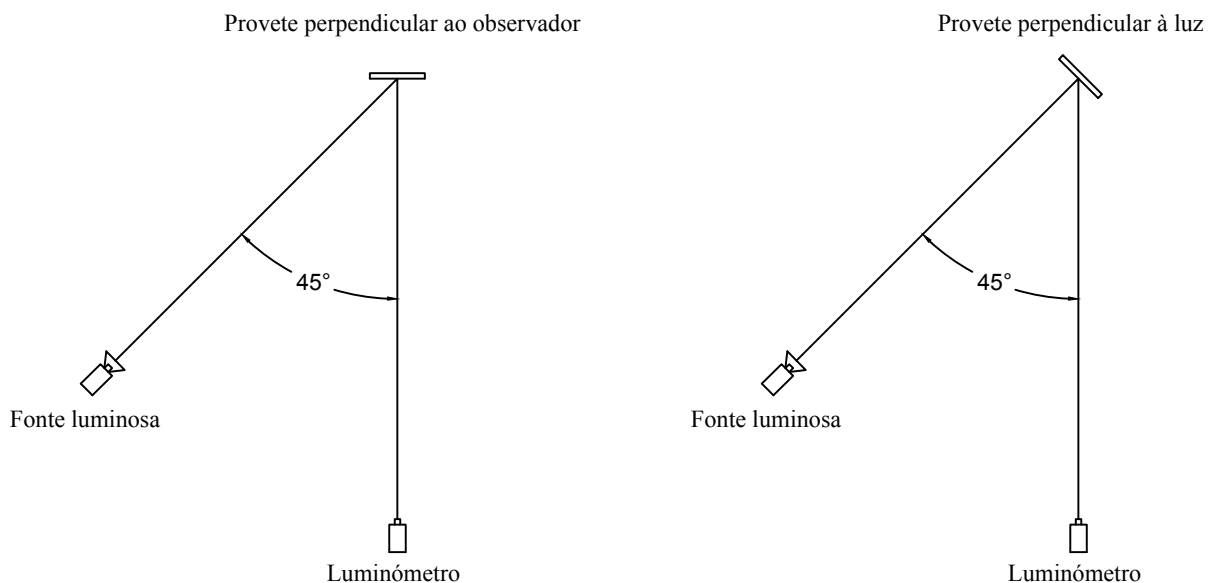


Fig. 4.11: Esquema do procedimento de ensaio para o ângulo de 45°

Visto que para o mesmo ângulo tem-se duas medições diferentes, definiu-se que quando o provete se encontra perpendicular ao observador denomina-se $45^\circ/0^\circ$ e quando este está perpendicular à fonte luminosa denomina-se $0^\circ/45^\circ$. Pretendeu-se desta forma simular uma situação real em que a luz pode incidir na superfície com ângulos diferentes. A luz incidente pode ser mais ou menos rasante, consoante a maior ou menor abertura do ângulo e mais ou menos perpendicular consoante a posição do provete.

Materiais

Os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos do ensaio da esfera integradora (secção 4.2.1), identificados nos quadros 4.1 e 4.2.

Metodologia

Tal como foi referido anteriormente cada provete é ensaiado nos ângulos 0° , 15° , 30° , 45° , 60° e 75° . Os ângulos são marcados no pavimento do laboratório, definindo-se um raio interior e exterior, correspondentes à posição da fonte luminosa e luminómetro, respectivamente.

É de salientar que o ângulo $0^\circ/0^\circ$ não é na realidade 0° , apresentando um ligeiro desvio de $3^\circ(0^\circ/3^\circ)$ para garantir que o luminómetro visualiza a totalidade do provete acoplado ao goniómetro. Este desvio não afecta a leitura, porque embora não estando totalmente perpendicular ao provete, o desvio é aceitável e não altera a medição. A inexistência do ângulo $0^\circ/75^\circ$ deve-se em parte à mesma razão, visto não ser possível visualizar a totalidade do provete para um ângulo tão oblíquo.

A figura 4.12 apresenta o esquema de ensaio para a obtenção da reflectância direcciona

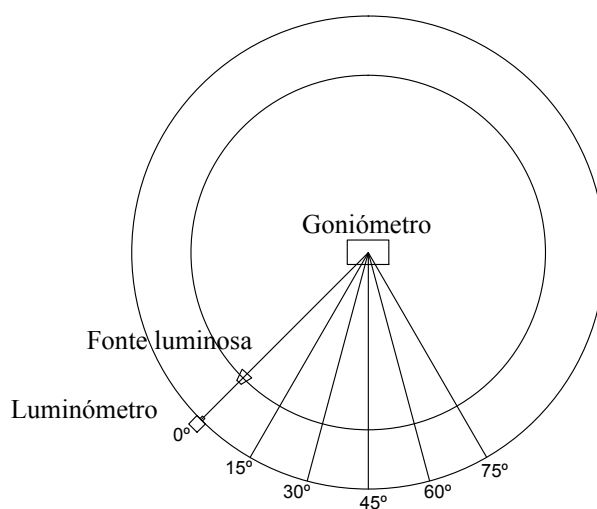


Fig. 4.12: Esquema de ensaio para a obtenção da reflectância direcciona

Antes de iniciar o ensaio, a lâmpada é ligada até atingir a temperatura necessária para produzir luz no comprimento de onda desejado.

Ao início e final de cada ângulo, é efectuada a medição da luminância padrão, obtida a partir de um padrão de calibração. São sempre efectuadas três leituras seguidas de luminância, seja do padrão ou dos provetes, efectuando-se a média. Em cada medição obtêm-se igualmente as coordenadas cromáticas com intuito de garantir que o luminómetro capta apenas a luminância proveniente do provete em ensaio.

Os provetes são ensaiados consecutivamente para cada relação de ângulos, de forma a manter a leitura do padrão de calibração para todos os provetes, sendo todos comparados com o mesmo valor de padrão, garantindo a fiabilidade da análise comparativa de resultados. O padrão de luminância usado (figura 4.13) apresenta uma reflectância de 96,3 %.



Fig. 4.13: Superfície padrão para determinação da reflectância dos provetes ensaiados

Para cada relação de ângulo, isto é, quando o provete é perpendicular à fonte luminosa ($0^\circ/X^\circ$) e quando este é perpendicular ao luminómetro ($X^\circ/0^\circ$), os valores finais de reflectância direcciona resultam, no caso dos provetes rugosos, da média entre os provetes *a* e *b* e dos provetes lisos dos valores directos de cada provete.

O cálculo da reflectância direcciona de cada provete, em cada ângulo, é obtida pela equação 4.1:

$$R_\theta(\%) = \frac{m_L}{m_P} \cdot R_{padr\tilde{a}o} \quad (4.1)$$

Nesta equação:

- R_θ é a reflectância direcciona em percentagem.
- m_L é a média das três medições consecutivas de luminância do provete ensaiado.
- m_P é a média das três medições consecutivas de luminância do padrão ao inicio e fim de ângulo avaliado.
- $R_{padr\tilde{a}o}$ é a reflectância do padrão em percentagem (96,3 %).

4.2.2 Termografia de infravermelhos

A radiação que designamos por Visível representa uma pequena parte do espectro electromagnético. Avançando no espectro electromagnético, para comprimentos de onda maiores, aproxima-se a região do infravermelho. Esta região do espectro corresponde à radiação de onda longa e da qual pouco se consegue gravar num filme fotográfico [HART, 1991]. A dificuldade que uma câmara fotográfica convencional demonstra em “ver” calor levou ao desenvolvimento de um novo tipo de visionamento, designado por Termografia de infravermelhos.

Tal como referido anteriormente (secção 3.1) a Termografia de infravermelhos é um método de análise não destrutiva que permite a avaliação qualitativa e quantitativa do desempenho térmico de um objecto, tendo em conta a variação da temperatura superficial. Pretende-se utilizar a Termografia como método de avaliação do desempenho térmico das diferentes tintas em estudo. O esquema da figura 4.14 traduz o processo de avaliação do desempenho térmico das tintas em laboratório.

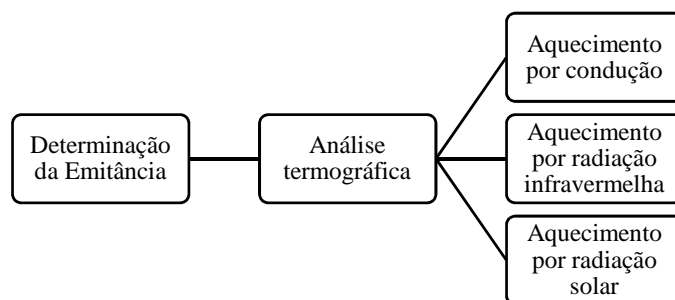


Fig. 4.14: Esquema dos ensaios realizados por análise termográfica em laboratório

O método de aquecimento utilizado (activo) recorre a uma placa de aquecimento que impõe um fluxo térmico ao provete em análise. Este fluxo de calor é imposto por condução (placa em contacto com o provete) ou por radiação infravermelha (placa afastada 2 cm do provete). Pretende-se avaliar se ocorrem alterações no desempenho térmico das tintas reflectantes, quando sujeitas a tipos de aquecimento diferentes. Além dos provetes individuais (cores diferentes), procedeu-se ao aquecimento do provete duo-cor. Este é caracterizado por ter aplicadas na sua superfície, tinta convencional e reflectante de cor branca e de cor preta. Este é igualmente aquecido por acção natural do Sol, comparando com os resultados obtidos pelos dois métodos anteriores (condução e radiação infravermelha).

Câmara termográfica

A caracterização do comportamento das várias tintas é obtida recorrendo-se a uma câmara termográfica, que mede e reproduz em imagens térmicas visíveis a radiação de infravermelho emitida pelos provetes. Tal como referido anteriormente (secção 3.3.1) a utilização de uma câmara termográfica requer alguns cuidados. Quando se procede à visualização do objecto, a câmara capta a radiação emitida não só pelo próprio objecto mas também reflectida por este. Ambas as componentes são, em parte, atenuadas pela atmosfera. Existe ainda uma terceira contribuição, correspondente à radiação emitida pela própria atmosfera. Porém, na maioria dos casos, a sua quantidade é suficientemente reduzida a ponto de ser negligenciável [FLIR, 2007].

Para a realização das termografias utilizou-se a câmara termográfica *ThermaCam P640* da FLIR Systems. A câmara termográfica utilizada permite não só captar imagens termográficas como também filmar. Esta funcionalidade é importante quando se pretende acompanhar em contínuo a variação da temperatura superficial do objecto. Este equipamento apresenta uma sensibilidade térmica de 0,06 °C, precisão de medição de $\pm 2,0$ °C, um detector do tipo Focal Plane Array (FPA) e um alcance espectral de 7,5-13 μm .

Para uma correcta utilização e leitura dos termogramas é necessário configurar a câmara termográfica em função das condições encontradas no local e tipo de material. A configuração da câmara termográfica resulta da introdução de vários parâmetros:

- Emitância do objecto (ϵ);
- Humidade relativa (HR);
- Distância do objecto (D_{obj});
- Temperatura aparente reflectida (T_{refl});

- Temperatura atmosférica (T_{atm}).

Alguns destes parâmetros podem ser difíceis de determinar ou quantificar, como a emitância ou a temperatura reflectida. A temperatura reflectida deixa de constituir um problema desde que o meio adjacente não contenha fontes de radiação intensa, assumindo-se, nesse caso, igual à temperatura atmosférica. A emitância é um parâmetro difícil de estimar, existindo actualmente algumas tabelas com valores de emitância para determinados materiais. No entanto estas são limitadas, não só pelo número reduzido de materiais disponíveis, mas também pelo facto das condições de medição para as quais o valor corresponde serem muito restritivas.

Emitância

A precisão das medições efectuadas pela câmara termográfica dependem da correcta estimativa do valor de emitância. Esta característica do material é influenciada pelas condições da superfície, temperatura e comprimento de onda. Recorreu-se a dois métodos para determinar em laboratório a emitância dos provetes em estudo, realizando-se os seguintes ensaios:

- Determinação da emitância usando um emissómetro portátil;
- Determinação da emitância usando o método da fita por análise termográfica.

Emissómetro portátil

O processo utilizado na determinação da emitância foi baseado na norma ASTM C 1371-04a que especifica o método para obter a emitância de materiais típicos usando um emissómetro portátil [ASTM, 2004]. O ensaio decorreu na Universidade Politécnica de Madrid, sendo o equipamento utilizado um emissómetro *Model AE1* da Devices & Services CO (figura 4.15). A apresentação dos valores medidos pelo emissómetro é efectuada através do dispositivo de leitura, *Model RD1*.



Fig. 4.15: Emissómetro *Model AE1* e dispositivo de leitura *Model RD1*

A finalidade do método de ensaio é proporcionar um meio de comparação entre as diferentes tintas ensaiadas, quantificando a emitância. Determinando a emitância é possível configurar correctamente a câmara termográfica. A emitância revela ser um parâmetro essencial na avaliação de temperaturas superficiais dos materiais, visto alterar de forma significativa a distribuição de temperaturas e a sua análise.

Materiais

Os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos do ensaio de espectrofotometria (secção 4.2.1), garantindo uma caracterização mais abrangente e fiável das propriedades das tintas em estudo.

Para este ensaio recorreu-se apenas aos provetes lisos (tipo 2) visto serem os mais indicados para o referido ensaio (quadro 4.3).

Quadro 4.3: Provetes de superfície lisa ensaiados

Nomenclatura		Cor	Marca
BrT	BrT2	Branco reflectante	CIN
PrN	PrN2	Preto convencional	CIN
PrT	PrT2	Preto reflectante	CIN
TeT	TeT2	Telha reflectante	CIN
TeN	TeN2	Telha convencional	CIN
CinT	CinT2	Cinzentos reflectante	CIN

Metodologia

O emissómetro *Model AE1* determina a emitância total hemisférica a uma temperatura de 65°C. A determinação da emitância processa-se em dois passos:

- Coloca-se o emissómetro sobre a amostra padrão de elevada emitância e ajusta-se o dispositivo de leitura *Model RD1* para indicar a emitância.
- Coloca-se o emissómetro sobre a amostra a ensaiar e efectua-se a leitura directa da emitância.

Método da fita

O processo utilizado na determinação da emitância foi baseado na norma ASTM E 1933-99a, que especifica o método para obter a emitância de materiais usando uma câmara termográfica [ASTM, 1999]. O ensaio decorreu no Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16)



Fig. 4.16: Câmara termográfica *ThermaCam P640*

Materiais

A determinação da emitância usando o método da fita decorreu ao mesmo tempo que eram ensaiados os provetes (quadro 4.5), nos ensaios de aquecimento por método activo. Assim sendo, os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos do ensaio de aquecimento por condução e radiação infravermelha (descritos nas secções subsequentes).

Metodologia

O método da fita é um método de determinação da emitância empírico. Trata-se de uma abordagem prática e simples, que permite, com alguma margem de erro, estimar a emitância de um material. Geralmente, quando se pretende efectuar uma inspecção termográfica, existe dificuldade em estimar a emitância devido à constituição heterogénea do edifício. Com uma estimativa correcta do valor de emitância consegue-se obter valores de temperatura fiáveis, correspondentes à realidade local, permitindo a interpretação correcta dos termogramas obtidos.

Torna-se claro que, se durante um levantamento termográfico de um edifício, se utilizar valores de emitância aleatórios haverá uma incorrecta caracterização do objecto analisado e, consequentemente, uma avaliação errada ou incompleta do edifício.

O método da fita consiste na colocação de um material, neste caso uma fita negra, cuja emitância é conhecida e que não varia consideravelmente com a temperatura. Em todos os provetes analisados, nos ensaios de aquecimento colocou-se a fita de emitância conhecida ($\varepsilon = 0,88$) na zona central do provete, conforme exemplificado na figura 4.17 para o provete BrN.

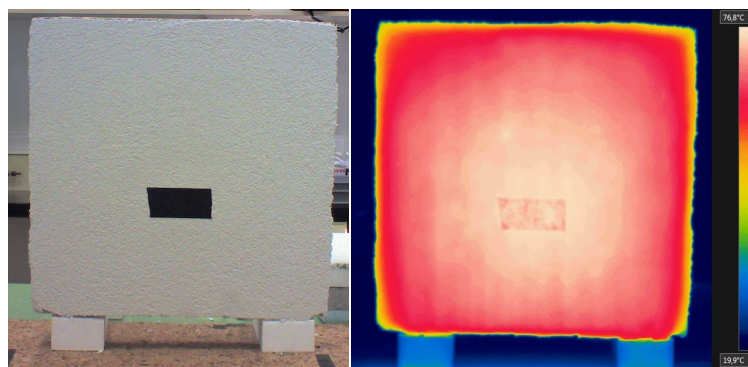


Fig. 4.17: Provete BrN com fita de emitância conhecida (esq.) e respectivo termograma (dir.)

A emitância da fita também foi determinada no ensaio realizado na Universidade Politécnica de Madrid usando um emissómetro portátil. Inicialmente a câmara termográfica é configurada com uma emitância de 0,88. Depois do conjunto provete-fita ser aquecido (por condução ou por radiação), efectuem-se várias termografias, ao longo do período de arrefecimento do provete.

A fita de emitância conhecida vai servir de referência para determinar a emitância da tinta porque, estando aderente ao provete, vai aquecer e atingir a mesma temperatura por condução. Mas observando a termografia esta surge com uma temperatura diferente porque os materiais têm emitâncias diferentes. É necessário, então, corrigir o valor de emitância para o valor real correspondente ao tipo de material que está a ser analisado. Esta correcção pode ser feita imediatamente na câmara termográfica ou no software para computador da FLIR Systems. O software apresenta várias vantagens, permitindo uma análise mais completa e profunda dos resultados.

Exemplificando para o provete BrN, para a termografia captada imediatamente depois de cessado o aquecimento, tem-se que, para uma emitância conhecida de $\varepsilon = 0,88$, atinge-se uma temperatura de 73,1°C na fita negra e de 74,6°C na superfície do provete. De seguida, corrige-se a emitância no software até a temperatura do provete ser igual a 73,1°C (temperatura da fita negra). O valor de emitância obtido depois de igualadas as temperaturas do provete e fita, corresponde à emitância real aproximada do

provete. Para todos os provetes foi colocada a fita negra e determinada de forma empírica o valor de emitância.

A determinação da emitância revela por isso, ser um factor importante na configuração da câmara termográfica. A figura 4.18 apresenta duas termografias do provete BrN mas com a câmara termográfica configurada com emitâncias diferentes, sendo os restantes parâmetros iguais.

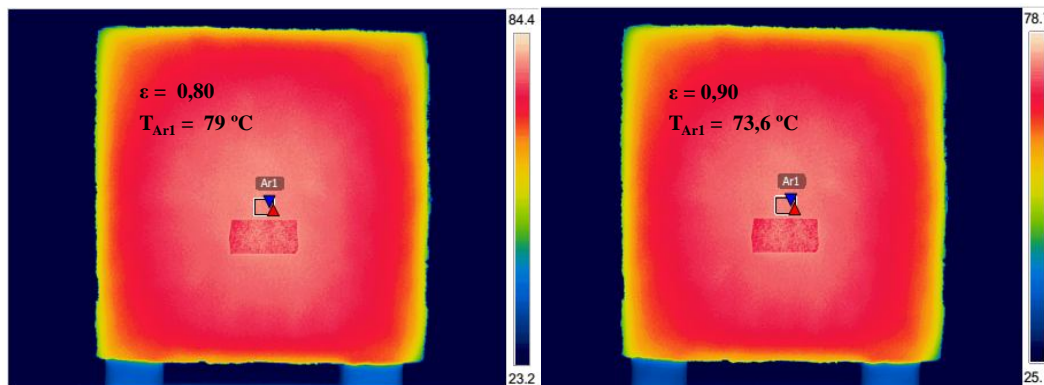


Fig. 4.18: Termografias do provete BrN com diferentes emitâncias

Para a mesma área de medição (Ar1), verifica-se que, configurando a câmara termográfica com um valor de emitância genérico para materiais de construção como $\varepsilon = 0,80$, obtêm-se uma diferença de $4,4\text{ °C}$ para a temperatura obtida com a configuração correcta ($\varepsilon = 0,90$), correspondente à emitância real da superfície em questão.

O método da fita permitiu obter resultados fiáveis e promissores, muito próximos dos que foram obtidos pelo emissómetro portátil, constituindo um método a considerar pois é de rápida e fácil aplicação.

Precisão do software

Procedeu-se à análise dos termogramas usando o software *ThermaCam Reporter 8.2* da FLIR Systems. O software permite visualizar e analisar no computador os termogramas obtidos, sendo possível criar relatórios termográficos, tendo por base as observações do investigador. A câmara termográfica possui um modo automático, que define os extremos de temperatura conforme a energia emitida por toda a superfície em avaliação. Nem sempre o modo automático é utilizado, recorrendo-se à configuração manual dos intervalos e gamas de temperatura analisados, para casos em que se pretenda um maior grau de precisão.

Salienta-se este facto porque, por exemplo, uma termografia definida para um intervalo de temperatura muito amplo surge totalmente da mesma cor em toda a sua extensão, aparentando não possuir nenhuma anomalia. Mas reduzindo o intervalo de temperatura, ou movendo a gama de temperaturas para valores mais baixos ou altos, observam-se diferenças que anteriormente não eram visíveis (figura 4.19).

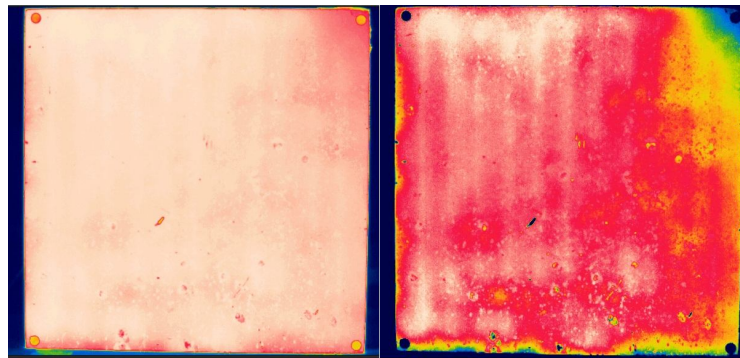


Fig. 4.19: Diferença entre dois termogramas apenas alterando o intervalo de temperatura

Observando a figura 4.19 percebe-se que um intervalo de temperatura mais reduzido permite uma melhor definição da imagem termográfica. As termografias apresentadas acima são referentes à placa de aquecimento, sendo que o termograma da esquerda corresponde ao modo automático e o da direita à configuração manual. Ao restringir o intervalo de temperatura (δT), no termograma da direita é possível identificar as imperfeições da superfície da placa e a zona onde passa a resistência eléctrica, que no modo automático não são tão perceptíveis. O termograma da esquerda tem $\delta T = 32,3^\circ\text{C}$ e o da direita $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$.

A verificação da conformidade dos resultados obtidos na câmara termográfica com os obtidos no software foi confirmada. O objectivo é avaliar se existe alteração dos resultados quando se analisa os termogramas no software, modificando a gama e intervalos de temperatura. Pretende-se verificar se as alterações efectuadas na câmara termográfica se mantêm no software e vice-versa.

Usando como objecto de teste a placa de aquecimento efectou-se quatro termogramas:

- Imagem completa no modo automático
- Imagem aproximada no modo automático
- Imagem completa com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$
- Imagem aproximada com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$

Para cada termograma obtido, da imagem completa ou aproximada, efectuou-se a alteração do intervalo de temperatura e verificou-se para o mesmo ponto de medição, se ocorria modificação da temperatura nesse ponto.

O quadro 4.4 compara a temperatura obtida na câmara termográfica e a que se obtém efectuando alterações no software.

Quadro 4.4: Comparação dos valores de temperatura obtidos na câmara termográfica e software

Câmara Termográfica	T ($^\circ\text{C}$)		Software
Imagem completa no modo automático (61,1 - 26)	59,3	59,3	Imagem completa com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$ (61,1 - 56)
Imagem completa com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$ (61,1 - 56)	59,3	59,3	Imagem completa no modo automático (61,1 - 26)
Imagem aproximada no modo automático (61,1 - 26)	59,6	59,6	Imagem aproximada com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$ (61,1 - 56)
Imagem aproximada com $\delta T = 5,1^\circ\text{C}$ (61,1 - 56)	59,4	59,4	Imagem aproximada no modo automático (61,1 - 26)

Os valores de temperatura não se alteram para a mesma termografia (da câmara termográfica para o software). Existe uma ligeira alteração quando se foca a imagem. A imagem “aproximada” apresenta valores diferentes da imagem completa (sempre com o mesmo ponto de medição). Para o mesmo termograma, se for alterado o alcance de temperaturas no software, isto é, aumentando-o ou diminuindo-o, o valor de temperatura não se altera. A única alteração será uma nova redistribuição de cores que se pode traduzir numa melhor resolução ou qualidade da imagem.

Desta forma é garantido que não existe perda ou alteração de informação da câmara termográfica para o software, podendo-se efectuar a análise no software com a segurança que os dados obtidos correspondem ao que foi observado *in situ*, independentemente da análise apenas ser feita 2, 4 ou 6 meses depois de efectuada a termografia.

Aquecimento por condução

O ensaio decorreu no NRI do Departamento de Edifícios do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16).

Com a realização deste ensaio pretende-se avaliar o desempenho térmico de provetes do tipo ETICS pintados com tintas reflectantes e convencionais quando aquecidos por condução e na fase de arrefecimento. A avaliação do desempenho térmico baseia-se na temperatura superficial obtida para cada provete e a sua variação ao longo da fase de arrefecimento. Procedeu-se à determinação das respectivas emitâncias (método da fita) e a sua variação em função da temperatura.

Para a realização do ensaio aplicou-se o método activo, recorrendo-se ao aquecimento do elemento em análise por acção de um fluxo térmico imposto, de forma artificial, usando um dispositivo emissor de radiação térmica, como a placa de aquecimento usada (figura 4.20).



Fig. 4.20: Placa de aquecimento

A secção de 60 x 60 cm permite à placa cobrir a totalidade da superfície dos provetes garantindo o aquecimento mais uniforme possível. As condições termo-higrométricas no laboratório são avaliadas recorrendo a um termo-higrométero *Rotronic Hidrolog* (figura 4.21).

Fig. 4.21: Termo-higrométo *Rotronic Hidrolog*

Materiais

Os provetes utilizados neste ensaio foram concebidos com o objectivo de reproduzir superfícies reais das envolventes dos edifícios, em particular do caso de estudo *in situ* deste trabalho (secção 4.3.1). Para esse efeito, criaram-se provetes de maiores dimensões, garantindo a representatividade física (tipo de material, tinta) e dimensional (espessura) do que está presente no exterior, originando provetes de superfície rugosa do tipo ETICS com secção de 50 x 50 cm (quadro 4.5).

Quadro 4.5: Provetes do tipo ETICS ensaiados

Nomenclatura	Cor	Marca
BrN	Branco convencional	CIN
BrT	Branco reflectante	CIN
PrN	Preto convencional	CIN
PrT	Preto reflectante	CIN
TeN	Telha convencional	CIN
TeT	Telha reflectante	CIN

Na figura 4.22 é possível observar as diferentes cores e textura dos provetes de maiores dimensões ensaiados.

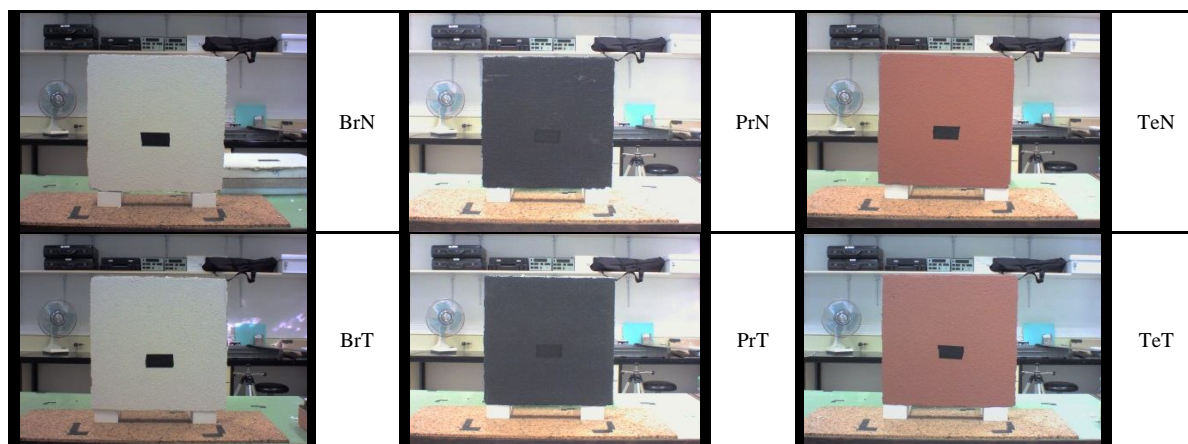


Fig. 4.22: Cores e textura dos provetes ensaiados

Metodologia

O dispositivo emissor de radiação térmica usado é uma placa de aquecimento que aquece durante 50 minutos até atingir uma temperatura constante. De seguida aquece-se por condução o provete durante 40 minutos, garantindo o melhor contacto placa-provete possível.

Cessado o aquecimento, retirada a placa de aquecimento, acompanha-se o processo de arrefecimento do provete até próximo da temperatura ambiente, registando a evolução da temperatura superficial, através de termografias realizadas em intervalos de 5 minutos. Entre o ensaio de cada provete efectua-se uma termografia da placa de aquecimento, controlando a variação de temperatura e garantindo que é constante.

A câmara termográfica está posicionada perpendicularmente à superfície dos provetes, a uma distância de dois metros. Antes de cada ensaio a câmara termográfica é configurada consoante as condições termo-higrométricas e materiais avaliados:

- Emitância do objecto ($\varepsilon = 0,88$);
- Humidade relativa (obtida do termo-higrómetro);
- Distância do objecto ($D_{obj} = 2$ metros);
- Temperatura aparente reflectida ($T_{refl} = T_{atm}$);
- Temperatura atmosférica ($T_{atm} =$ obtida do termo-higrómetro).

Inicialmente define-se a emitância igual a 0,88 para aplicação do método da fita (secção 4.2.2) e desta forma determina-se a emitância de cada provete. Verificou-se que, a partir dos 15 minutos de arrefecimento, a temperatura superficial dos provetes estabiliza/converge para a temperatura ambiente, não sendo necessário efectuar mais termografias depois desse limite.

Na figura 4.23 observa-se o provete BrN a ser ensaiado por condução.

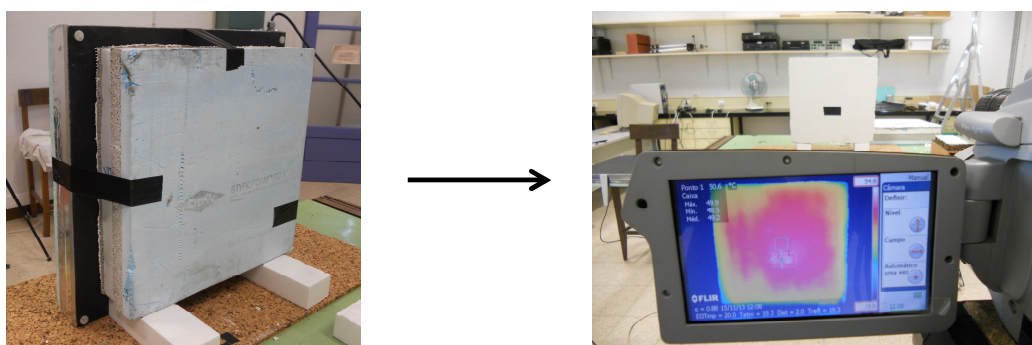


Fig. 4.23: Método de aquecimento por condução

O aquecimento é efectuado com o provete na vertical, simulando a fachada de um edifício. O provete é colocado sobre dois apoios de poliestireno expandido, evitando que o calor proveniente da base afecte as termografias. O contacto placa-provete é assegurado por fitas aderentes que exercem pressão, permitindo um melhor contacto.

A análise dos termogramas é efectuada no software, definindo-se zonas de medição iguais e sempre no mesmo local, para todos os termogramas obtidos, garantindo que a medição da temperatura é efectuada no mesmo local. Utilizaram-se áreas de medição em vez de pontos porque estas retornam valores de temperatura superficial mais aproximados e homogéneos que o ponto de medição.

Aquecimento por condução - Provete duo-cor

O ensaio decorreu no NRI do Departamento de Edifícios do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16).

Pretende-se com o ensaio do provete duo-cor permitir a visualização instantânea da diferença, ou não, entre tintas reflectantes e convencionais da mesma cor, quando sujeitas a um aquecimento, neste caso por condução.

Materiais

O provete utilizado neste ensaio foi concebido com o objectivo de reproduzir as superfícies reais das envolventes dos edifícios, em particular do caso de estudo *in situ* deste trabalho (secção 4.3.1). O provete duo-cor é constituído pelo mesmo material dos provetes usados anteriormente (superfície rugosa do tipo ETICS) e apresenta a mesma secção 50 x 50 cm.

O provete duo-cor é caracterizado por neste ter sido aplicado tinta de duas cores (preto e branco), dos dois tipos (reflectante e convencional), tal como é possível identificar na figura 4.24. A superfície do provete está dividida em quatro secções de igual dimensão, cada uma pintada com uma tinta diferente: BrT, BrN, PrT e PrN.

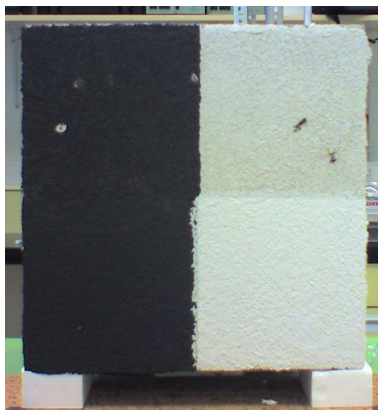


Fig. 4.24: Provete duo-cor

Metodologia

Este ensaio apresenta a mesma metodologia que o ensaio anterior (aquecimento por condução), residindo a diferença no provete avaliado (e no facto de não se aplicar o método da fita). O período de arrefecimento foi prolongado até aos 30 minutos, captando-se termografias de 2 em 2 minutos. O prolongamento e diminuição do intervalo entre termografias permite um acompanhamento mais preciso do desempenho térmico das tintas reflectantes. A utilização do provete duo-cor permite a comparação de desempenhos, dentro do mesmo provete, concentrando num só provete as conclusões obtidas no ensaio de aquecimento por condução em provetes individuais.

Aquecimento por radiação infravermelha

O ensaio decorreu no NRI do Departamento de Edifícios do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16).

Pretende-se avaliar o desempenho térmico de provetes do tipo ETICS pintados com tintas reflectantes e convencionais quando aquecidos por radiação infravermelha e na fase de arrefecimento. A avaliação do desempenho térmico baseia-se na variação da temperatura superficial em função do tipo de tinta aplicado.

Tal como no aquecimento por condução, para a realização do ensaio aplicou-se o método activo, usando a placa de aquecimento como dispositivo emissor de radiação térmica (figura 4.20).

Materiais

Para o ensaio usaram-se os mesmos provetes do ensaio de aquecimento por condução (quadro 4.5).

Metodologia

A avaliação do desempenho térmico baseia-se na determinação da temperatura superficial de cada provete e na sua variação ao longo da fase de arrefecimento. Primeiramente é colocada a placa de aquecimento a aquecer, durante 50 minutos, até atingir uma temperatura constante.

De seguida aquece-se o provete por radiação durante 40 minutos, colocando a placa de aquecimento a 2 cm do provete. A distância de 2 cm foi definida com o intuito de garantir o fluxo de energia suficiente, que garantisse o diferencial de temperatura necessário para efectuar termografias.

Finalizado o período de aquecimento, a placa de aquecimento é retirada e acompanha-se o processo de arrefecimento do provete até atingir uma temperatura superficial próxima da temperatura ambiente. Ao longo da fase de arrefecimento é registada a evolução da temperatura superficial, através de termografias realizadas em intervalos de 5 minutos. Entre o ensaio de cada provete efectua-se uma termografia da placa de aquecimento, controlando a variação de temperatura e garantindo que é constante.

Tal como no ensaio de aquecimento por condução, a câmara termográfica está posicionada perpendicularmente à superfície dos provetes, a uma distância de dois metros. Antes de cada ensaio a câmara termográfica é configurada consoante as condições termo-higrométricas e materiais avaliados:

- Emitância do objecto ($\varepsilon = 0,88$);
- Humidade relativa (obtida do termo-higrómetro);
- Distância do objecto ($D_{obj} = 2$ metros);
- Temperatura aparente reflectida ($T_{refl} = T_{atm}$);
- Temperatura atmosférica ($T_{atm} =$ obtida do termo-higrómetro).

Inicialmente define-se a emitância igual a 0,88 para aplicação do método da fita (secção 4.2.2) e desta forma determina-se a emitância de cada provete.

Na figura 4.25 observa-se o provete BrT a ser ensaiado por radiação infravermelha. O aquecimento é efectuado com o provete na vertical, simulando a fachada de um edifício.

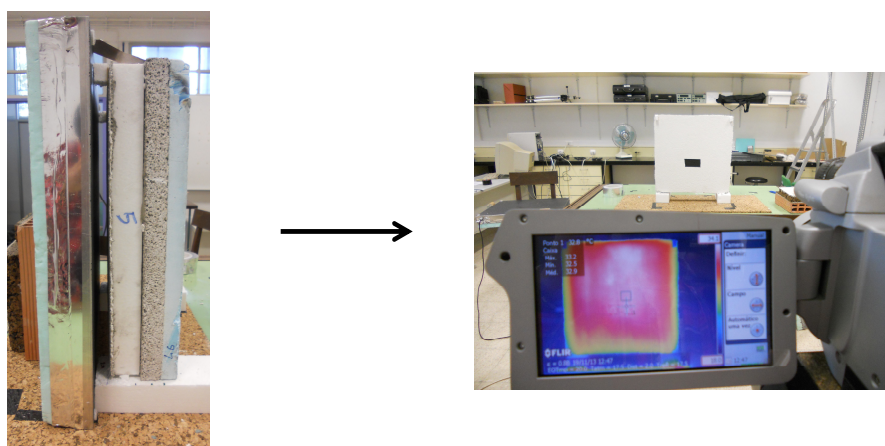


Fig. 4.25: Método de aquecimento por radiação infravermelha

O provete é colocado sobre dois apoios de poliestireno expandido, evitando que o calor proveniente da base afecte as termografias. A manutenção do espaço de ar entre a placa de aquecimento e o provete é assegurado por fitas aderentes e espaçadores em poliestireno expandido.

Aquecimento por radiação infravermelha - Provete duo-cor

O ensaio decorreu no NRI do Departamento de Edifícios do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16).

Tal como no aquecimento por condução, o mesmo ensaio foi realizado por radiação infravermelha, utilizando para esse efeito o provete duo-cor.

Materiais

O provete utilizado neste ensaio é o mesmo do ensaio de aquecimento por condução - provete duo-cor.

Metodologia

Este ensaio segue a mesma metodologia que o ensaio anterior (aquecimento por radiação infravermelha), residindo a diferença no provete avaliado. Desta forma, é possível a comparação de desempenhos térmicos, na mesma superfície, concentrando num só provete as conclusões obtidas no ensaio de aquecimento por radiação infravermelha a provetes individuais.

Aquecimento por radiação solar - Provete duo-cor

O ensaio decorreu no NRI do Departamento de Edifícios do LNEC, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.16).

Pretende-se avaliar o comportamento de tintas reflectantes e convencionais quando aquecidas por radiação solar e consequente arrefecimento, em condições controladas de laboratório. O ensaio realizado permite verificar se tintas reflectantes funcionam melhor quando expostas a radiação solar, avaliando a sua capacidade reflectante e, consequentemente, o desempenho térmico.

Para a realização do ensaio aplicou-se o método activo, em que o aquecimento do elemento em análise ocorre por acção da radiação solar. Tem-se como objectivo avaliar apenas o desempenho térmico das tintas e não quantificar a emitância.

Materiais

O provete utilizado neste ensaio é o mesmo do ensaio de aquecimento por condução e por radiação infravermelha - provete duo-cor. A utilização do provete duo-cor permite a comparação de desempenhos térmicos na mesma superfície e estabelece a ponte entre os resultados obtidos por termografia em laboratório e no caso de estudo *in situ* - células experimentais (secção 5.3.2).

Metodologia

Este ensaio segue a mesma metodologia que o ensaio anterior (aquecimento por radiação infravermelha - provete duo-cor), residindo a diferença apenas na forma como é efectuado o aquecimento. O provete duo-cor é previamente exposto à radiação solar, na estação de envelhecimento natural do NRI, durante 6 horas, no período das 8h-14h (figura 4.26).



Fig. 4.26: Método de aquecimento por radiação solar

Desta forma obtém-se um aquecimento progressivo, conseguindo-se que seja homogéneo em toda a superfície do provete. Finalizado o aquecimento, o provete duo-cor é transportado para o interior do laboratório, onde são efectuadas termografias durante o período de arrefecimento. O período de arrefecimento é de, igualmente, 30 minutos, captando-se termografias de 2 em 2 minutos.

4.3 Condições reais

Realizada a caracterização das tintas em laboratório, procedeu-se à análise das tintas reflectantes e convencionais em condições reais de exposição. Tal como foi referido anteriormente, as tintas reflectantes usadas no âmbito deste trabalho são actualmente aplicadas, em geral, em coberturas, pois estas constituem uma zona do edifício com elevados ganhos térmicos.

O balanço energético de um edifício não depende apenas dos ganhos térmicos através da cobertura. Por este motivo decidiu-se avaliar *in situ* o desempenho térmico de tintas reflectantes e convencionais quando aplicadas em fachadas.

Para avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes em condições reais de exposição recorreu-se a três células experimentais construídas à escala real. As células C4, C5 e C6 foram construídas no âmbito

de uma Tese de Doutoramento em curso, cujo objectivo é avaliar o desempenho térmico de soluções de coberturas inovadoras [COSTA, em curso].

4.3.1 Células experimentais

As células experimentais encontram-se completas e as soluções de protecção térmica de cobertura e revestimento de fachadas já implementadas. Usando como base as três células experimentais, procedeu-se à aplicação das tintas reflectantes nas fachadas, em faixas verticais de três cores: branco, preto e telha (figura 4.27).



Fig. 4.27: Células experimentais pintadas com as três tintas reflectantes

As células experimentais foram construídas e posicionadas por forma a que as paredes fiquem orientadas segundo os quatro pontos cardeais principais: Norte, Sul, Este e Oeste.

Das três células experimentais existentes apenas a célula C5 (central) será alvo de estudo, conforme ilustrado na figura 4.28.



Fig. 4.28: Representação computadorizada da localização da célula experimental C5 no *campus* do LNEC

Constituição

As três células experimentais têm dimensões idênticas (4,80 m x 4,80 m x 3,74 m) e partilham a mesma solução construtiva. A solução construtiva consiste em paredes altamente isoladas termicamente, compostas por blocos vazados de cofragem permanente em EPS (poliestireno expandido moldado) preenchidos *in situ* com varões de aço e betão bombeado para preenchimento. A espessura total da parede é de 0,28 m. A cobertura é constituída por pré-lajes de betão que servem de cofragem a uma camada de betão complementar com função resistente, incluindo armadura complementar, totalizando

uma espessura de 0,20 m. A fundação da célula é constituída por quatro travessas de betão e a laje térrea por um massame de betão.

A envolvente vertical (fachadas) apresenta elevada resistência térmica ($R_t = 3,60 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$), por forma a ser possível uma melhor avaliação e contabilização de desempenho dos produtos aplicados nas coberturas em telhado.

Na figura 4.29 apresenta-se um desenho computadorizado da célula experimental e de um corte, onde é possível observar a estrutura em blocos de EPS vazados das paredes, a laje de cobertura e a laje térrea.

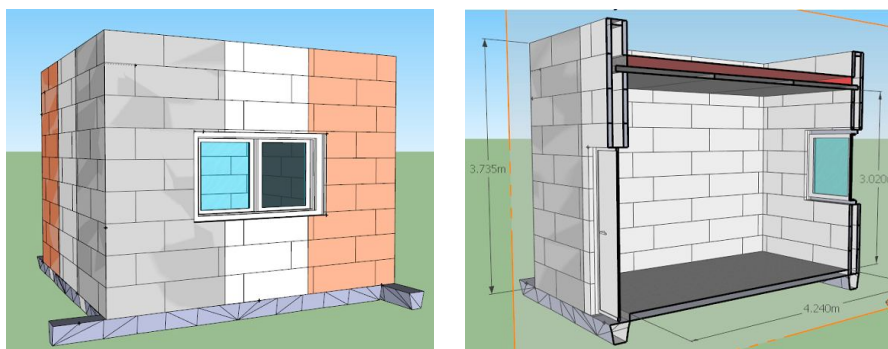


Fig. 4.29: Pormenor construtivo e corte da célula experimental

Sobre as paredes da célula experimental, aproveitando o suporte em EPS, aplicou-se um reboco delgado, em várias camadas, armado com rede de fibra de vidro e protegido por uma camada de acabamento, constituindo o sistema ETICS.

Conforme foi referido, finalizada a execução de revestimentos pintou-se em cada fachada (Norte, Sul, Este e Oeste) das três células experimentais, três faixas verticais de igual largura, com tinta reflectante em três cores: preto, branco e telha.

Sistemas de aquisição de dados

As células experimentais estão providas com um data logger e um hygrolog com registo. Todos os parâmetros foram medidos a cada minuto, tendo sido registados os valores médios em intervalos de 10 minutos. As células experimentais estão equipadas com sistemas de climatização (HVAC), ventilação mecânica, grelhas para ventilação natural e contadores de energia.

Junto às células foi implementada uma estação meteorológica que permite medir e registar a temperatura do ar, velocidade do ar e direcção, humidade relativa, precipitação e irradiação solar em planos vertical e horizontal.

Para a avaliação das diferentes temperaturas na parede foram colocados termopares entre o isolamento térmico e o acabamento pintado com tintas reflectantes (Figura 4.30). Um por cada faixa, das fachadas Oeste e Sul da célula experimental C5. A inclusão de termopares na fachada da célula experimental C5 permite validar as temperaturas superficiais obtidas por termografia.

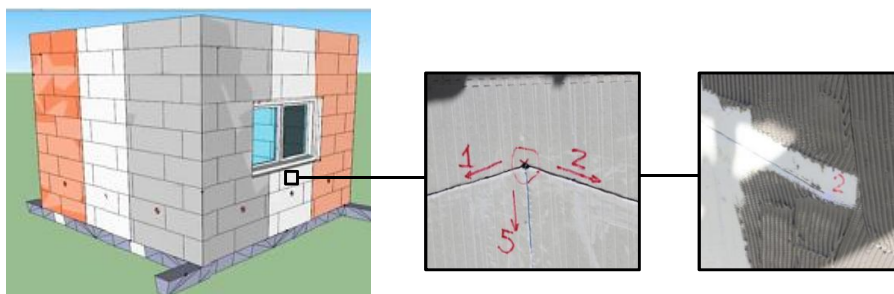


Fig. 4.30: Localização dos termopares na parede Sul e Oeste da célula experimental C5 (entre o isolamento térmico e revestimento)

4.3.2 Reflectância total

Após avaliação em laboratório das características (reflectância e emitância) de tintas reflectantes e convencionais, procedeu-se à caracterização da reflectância, quando estas são aplicadas em superfícies idênticas, à escala real (células experimentais) e expostas em condições climáticas reais. Contrariamente ao que acontece em laboratório, a reflectância vai depender de mais factores (climáticos), determinando-se a sua influência e preponderância na capacidade reflectiva da fachada, tendo por base uma situação real de aplicação.

Piranómetro

O ensaio decorreu no *campus* do LNEC, junto ao Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) do Departamento de Edifícios, utilizando o equipamento *LI-189* e um sensor de irradiância *LI-COR LI 210 SA*, adequado para este ensaio (figura 4.31).



Fig. 4.31: Conjunto sensor de irradiância e mostrador digital

O mostrador digital *LI-189* é usado conjuntamente com um sensor de irradiância *LI-COR LI 210 SA*, transformando-se o conjunto num fotómetro (sensor de irradiância + mostrador) e é utilizado para medir a radiação solar global em $W \cdot m^{-2}$ [LI-COR, 1990].

Este ensaio tem como objectivo determinar a reflectância total da célula experimental C5 em três orientações diferentes: Este, Sul e Oeste.

Materiais

Tal como foi referido anteriormente, das três células experimentais existentes apenas a célula experimental C5 será alvo de estudo, conforme ilustrado na figura 4.28. A parede orientada a Oeste

além da tinta reflectante também inclui em cada faixa, uma zona pintada com uma tinta convencional da mesma cor (figura 4.32). Esta zona situa-se sensivelmente a meia altura da parede e apresenta uma secção de 20 cm x 20 cm.

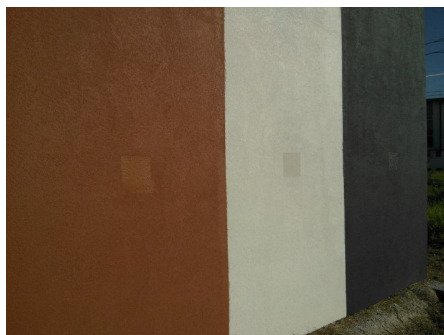


Fig. 4.32: Pormenor dos três quadrados pintados com tinta convencional na Parede Oeste

Desta forma é possível comparar tintas reflectantes e convencionais, assim como, o impacto que a cor tem na reflectância.

Metodologia

A recolha de dados foi efectuada em três períodos diferentes do dia: 10h30, 13h30 e 16h30. Pretende-se obter uma amostra representativa de um dia normal de exposição solar nas alturas em que o sol está baixo (10h30 e 16h30) e quando está mais alto (13h30), para o período em estudo (Inverno). A realização do ensaio no período de Inverno possibilita a avaliação do comportamento deste tipo de tintas no período em que, à primeira vista, o desempenho da tinta reflectante não é tão bom.

Observa-se que em todas as paredes, independentemente da orientação, a radiação incidente é sempre superior à global. Esta situação pode ser explicada pelo facto da parede estar a receber, não só a radiação directa e difusa do sol, mas também uma componente que é reflectida pelo solo. Tentou-se minimizar este fenómeno ao efectuar as medições a alturas do solo superiores a 50 cm.

Na figura 4.33 é possível observar que o sensor foi acoplado a uma vara, de modo a permitir ao operador efectuar medições o mais afastado possível da parede, evitando-se a obstrução da radiação solar e minimizando a sombra na zona de leitura e, consequentemente, o erro associado. As medições foram efectuadas a 1,5 cm da parede de forma a captar a radiação reflectida pela parede e minimizar a proveniente de outras fontes.



Fig. 4.33: Equipamento utilizado nas medições de reflectância total no exterior

Na figura 4.34 estão representadas as curvas de irradiância solar extraterrestre e ao nível do mar, o espectro de resposta do sensor e a curva do corpo negro. O alcance do sensor cinge-se à faixa espectral 400 nm a 1100 nm, incluindo grande parte da radiação solar global dentro do espectro de resposta do sensor, tendo como pico de resposta o comprimento de onda de 1 μm ou 1000 nm.

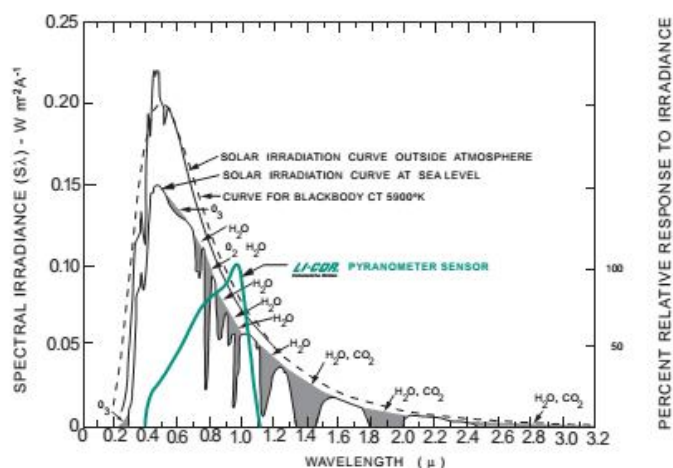


Fig. 4.34: Espectro de resposta do piranómetro e distribuição de energia do espectro solar adaptado de [LI-COR]

O piranómetro detecta e determina a radiação incidente no sensor em $W \cdot m^{-2}$. Desta forma, é possível determinar a radiação incidente na parede e a que é reflectida por esta.

A reflectância total é obtida aplicando a seguinte expressão:

$$R(\%) = \frac{Rad.Reflectida}{Rad.Incidente} \cdot 100 \quad (4.2)$$

O sensor apresenta melhores resultados quando é usado para medir luz do dia desobstruída [LI-COR]. A figura abaixo demonstra que as condições meteorológicas na altura do ensaio estavam de acordo com as especificações do sensor.



Fig. 4.35: Condições meteorológicas no dia de ensaio

4.3.3 Termografia de infravermelhos

Inspecção termográfica

O ensaio decorreu na célula experimental C5 no *campus* do LNEC, junto ao Núcleo de Revestimentos e Isolamentos (NRI) do Departamento de Edifícios, utilizando o equipamento *ThermaCam P640* da FLIR Systems adequado para este ensaio (figura 4.36).



Fig. 4.36: Câmara termográfica ThermoCam P640 e tripé com nível

Juntamente com a câmara termográfica, utilizou-se um tripé com nível, que garante a estabilidade e nivelamento necessários para efectuar as termografias correctamente.

Pretende-se com este ensaio testar a Termografia de infravermelhos como uma técnica válida na avaliação do desempenho térmico das tintas reflectantes e convencionais aplicadas nas fachadas das células experimentais, quando sujeitas a condições reais de exposição (radiação solar, vento, precipitação). Tal como anteriormente referido, a termografia permite conhecer a distribuição de temperatura superficial das fachadas ao medir a radiação emitida pelas suas superfícies.

O esquema da figura 4.37 exemplifica os meios utilizados para determinar a temperatura superficial nas paredes da célula experimental C5.

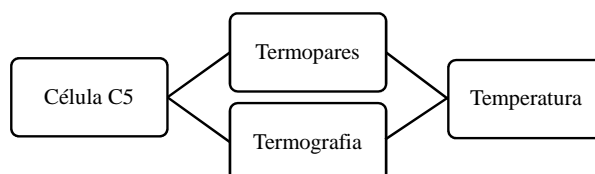


Fig. 4.37: Esquema para obtenção da temperatura superficial das paredes da célula experimental C5

Como apoio ao diagnóstico termográfico, contou-se com os termopares previamente colocados entre o isolamento térmico e o sistema de pintura da célula experimental C5 (secção 4.3.1).

Materiais

Apenas a célula experimental C5 foi alvo de estudo. As termografias foram efectuadas nas paredes orientadas a Sul e Oeste (figura 4.38).



Fig. 4.38: Paredes da célula experimental C5 avaliadas (Oeste e Sul)

Metodologia

A metodologia usada normalmente neste tipo de procedimentos é comum a todas as inspecções termográficas, embora a forma exacta que esta toma, seja ditada pelo tipo de inspecção e resultados requeridos. Assim sendo, a metodologia criada para a inspecção termográfica teve em conta o tipo de informação que se pretende.

No total efectuaram-se três campanhas de medição, tendo cada uma, a duração de um dia. Estas tiveram lugar no período de Verão, nas datas 11/07/2013, 16/08/2013 e 19/08/2013. Em cada campanha é efectuado o levantamento termográfico das paredes Sul e Oeste, em alturas diferentes do dia. São realizadas termografias às: 11h, 13h, 16h, 18h30 e 20h30 (ainda às 19h30 mas apenas para a campanha de 19/08/2013).

Cada sessão de termografia efectuada nas diversas alturas do dia e orientações, processa-se de igual forma:

- Termografia geral da parede, a 10 metros de distância;
- Termografia de cada faixa de cor, a 2 metros (parede Oeste) e 3 metros (parede Sul) de distância.

A utilização desta técnica termográfica aplicada a paredes requer algumas precauções, inerentes não só ao facto de ser um ensaio em condições reais de exposição, mas também pelo funcionamento da câmara termográfica. Assim sendo, apresentam-se de seguida algumas recomendações práticas para utilização da câmara termográfica em condições semelhantes, complementares às referidas na secção 3.3.1, com o intuito de melhorar a qualidade da termografia e facilitar a análise.

Recomendações:

- configurar correctamente a câmara termográfica, introduzindo os vários parâmetros;
- aplicar, se necessário, o método da fita para determinação da emitância (secção 4.2.2);
- focar a imagem;
- iniciar no modo automático, definindo máximos e mínimos de temperatura;
- ajustar gama de temperaturas (δT);
- quanto mais estreita a gama de temperatura, mais fácil é identificar anomalias e variações de temperatura;
- se possível, manter sempre a mesma gama de temperatura, para posterior comparação directa de termografias;
- se possível, definir uma área de medição, constante em todas as campanhas no mesmo local;
- proteger a câmara termográfica, por exemplo com um guarda-sol, da incidência solar directa na lente;
- evitar efectuar termografias a grande distância do objecto;
- centrar e não variar muito o ângulo ($< 60^\circ$), mantendo a câmara o mais perpendicular possível;

- monitorizar e registar condições atmosféricas antes e durante a inspecção.

A figura 4.39 apresenta o procedimento usado para obtenção das termografias da parede Oeste e Sul da célula experimental C5.

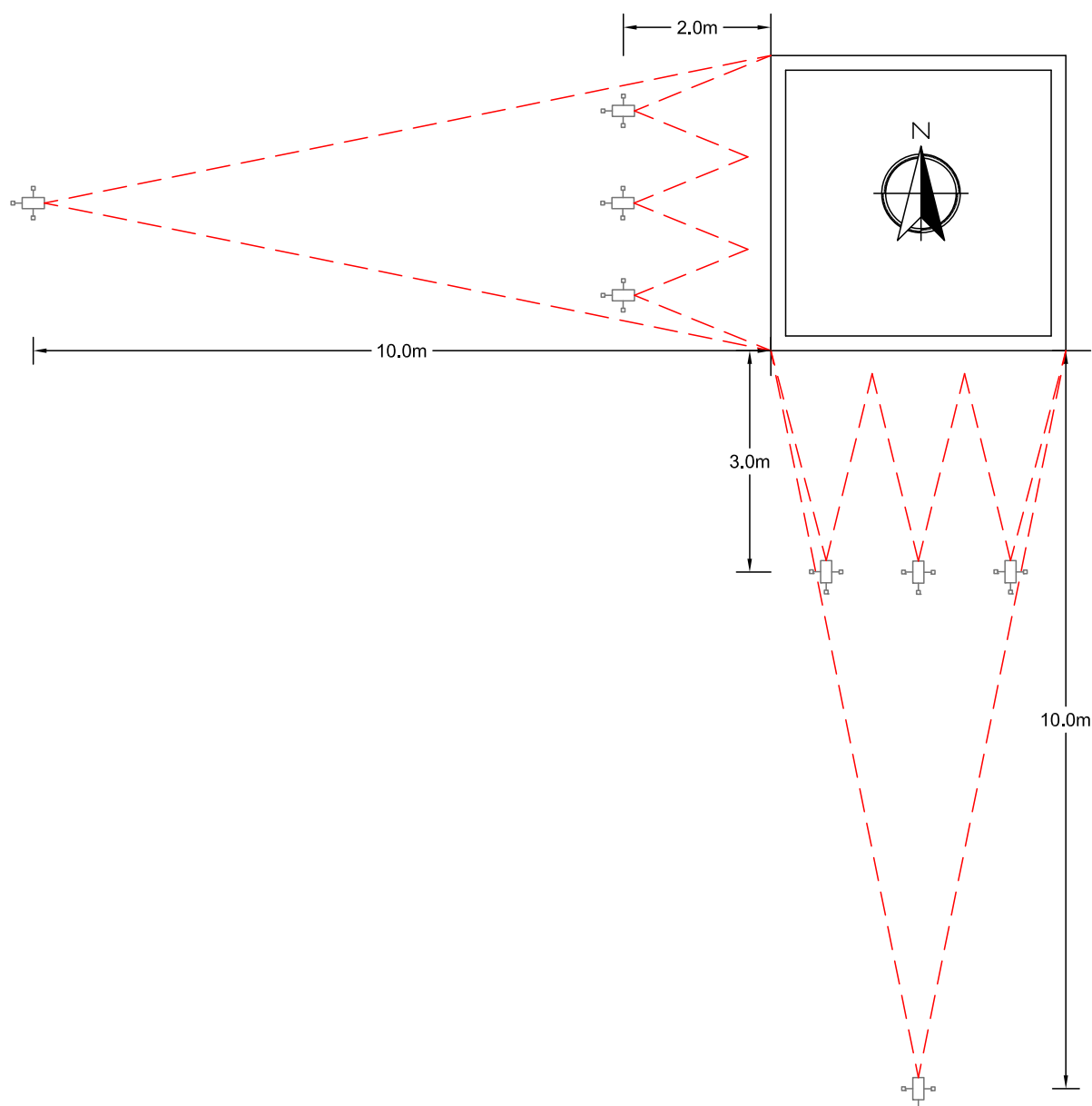


Fig. 4.39: Esquema representativo do procedimento adoptado para obtenção de termografias nas paredes Oeste e Sul

Pretende-se assim avaliar o comportamento térmico da tinta reflectante ao longo de um dia de exposição real e compará-lo com o de uma tinta convencional. O acompanhamento ao longo dia permitiu determinar os períodos mais favoráveis para efectuar termografias e os factores de risco que estão implícitos numa técnica *in situ*.

Capítulo 5

Apresentação e análise de resultados

5.1 Introdução

Realizados os vários ensaios de caracterização e avaliação das tintas reflectantes e convencionais em laboratório e *in situ*, apresentam-se de seguida os resultados e respectiva análise. Procedeu-se primeiramente à caracterização da reflectância e emitância em laboratório, efectuando-se de seguida em condições reais de exposição. Recorreu-se, entre outros, à Termografia de infravermelhos como método de avaliação do desempenho térmico deste tipo de tintas, avaliando-se a sua aplicabilidade como ferramenta de diagnóstico.

5.2 Condições laboratoriais

Em condições controladas de laboratório realizaram-se ensaios que permitiram determinar a reflectância total e a reflectância direccionada das tintas em estudo. Recorrendo à Termografia de Infravermelhos realizaram-se determinações complementares, com o intuito, de avaliar o desempenho térmico das tintas reflectantes e convencionais.

5.2.1 Reflectância total

Realizaram-se dois ensaios que permitiram determinar, na região do visível, a reflectância total de tintas reflectantes e convencionais, de várias cores e aplicadas em suportes diferentes, por espectrofotometria e pela esfera integradora. Diferenciaram-se os resultados em termos da cor, tipo de tinta, faixa espectral e tipo de superfície.

Espectrofotometria

Grande parte das superfícies dos materiais de construção que estão expostas à radiação solar são rugosas, assim como a superfície dos paramentos das células experimentais que constituem o caso de estudo *in situ* deste trabalho (secção 4.3.1). Assim, optou-se por inicialmente avaliar a reflectância deste tipo de superfície (provetes tipo 1). Os provetes ensaiados encontram-se identificados nos quadros 4.1 e 4.2 (secção 4.2.1).

Na figura 5.1 é possível observar a reflectância espectral para cada tipo de cor e acabamento, no intervalo espectral de 380 a 900 nm. Este intervalo engloba a região do visível e uma pequena parte do infravermelho próximo.

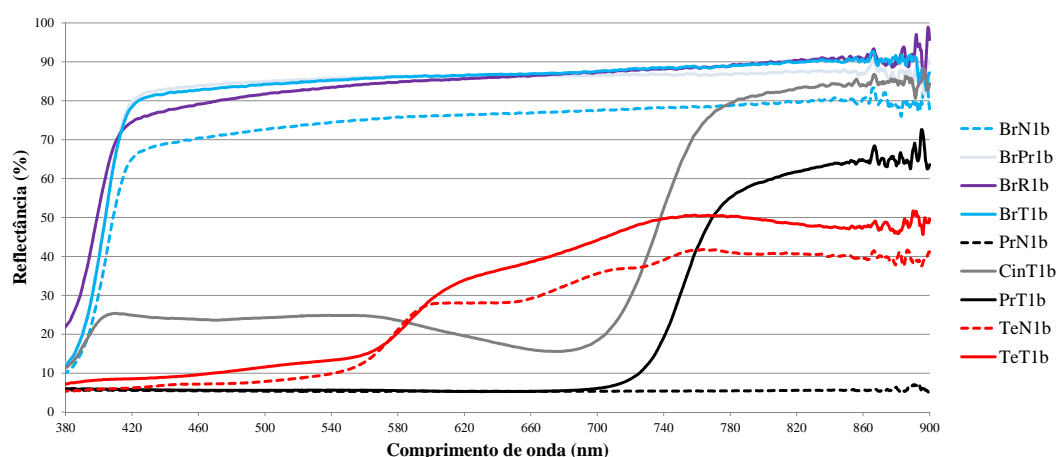


Fig. 5.1: Curvas espectrais de reflectância para provetes tipo 1

Analisando as curvas da variação espectral de reflectância é perceptível que os provetes da mesma cor, independentemente do tipo de tinta (reflectante ou convencional), apresentam um comportamento semelhante ao longo dos comprimentos de onda avaliados. A única excepção acaba por ser a cor preta, que até 700 nm apresenta curvas espectrais de reflectância coincidentes, verificando-se, a partir deste comprimento de onda, um crescimento acentuado dos valores de reflectância do provete preto reflectante rugoso (PrT1b).

Cor e Tipo de tinta

Analisando com maior pormenor o gráfico de reflectância espectral das diferentes tintas, ilustrado através da figura 5.1 e os resultados nominais apresentados nos quadros 5.1 e 5.2, é possível observar que nas, regiões do visível e infravermelho próximo (NIR), a cor branca, independentemente de ser tinta reflectante ou não, mantém um valor de reflectância sensivelmente constante, que vai crescendo à medida que aumenta o comprimento de onda, e que apresenta uma queda acentuada quando se aproxima da região da radiação ultravioleta (abaixo dos 380 nm).

Verifica-se que a tinta reflectante (proвете BrT1b) apresenta valores de reflectância superiores ao da tinta convencional (proвете BrN1b) no intervalo espectral avaliado, permitindo comprovar que a tinta reflectante melhora o comportamento reflectivo do suporte. Consta-se uma diferença constante de aproximadamente 10% de reflectância entre ambos os provetes ao longo do intervalo avaliado.

Observa-se que a cor do suporte não tem influência na variação da reflectância pois a curva de reflectância espectral do provete BrPr1b é, praticamente, coincidente com a do provete BrT1b, constatando-se uma diferença de 0,1% de reflectância total, isto é, ao longo de todo o comprimento de onda estudado. Tal significa que a base preta do provete BrPr1b não afecta o desempenho do provete em termos de reflectância, que em muito se deve a um bom cobrimento da superfície por parte da tinta branca.

O revestimento térmico especial (proвете BrR1b) apresenta um comportamento muito semelhante à tinta reflectante branca (proвете BrT1), principalmente junto da região do infravermelho próximo.

A cor cinza não existe no catálogo de cores da marca de tintas usadas neste estudo. O provete de cor cinza foi criado com o objectivo de produzir uma tinta intermédia entre o branco e o preto, que em teoria se previsse que apresentasse um desempenho térmico melhor que a cor telha ou preta. Relativamente

à cor preta é normal que a cor cinza apresentasse maior reflectância total pois é uma cor mais clara. Comparativamente com a cor telha seria mais difícil de prever.

A tinta usada no provete CinT1b resulta da mistura 50/50 da cor branco reflectante (BrT) com a cor preto reflectante (PrT). Na figura 5.2 observa-se que a cor cinza até ao comprimento de onda de 700 nm apresenta uma alternância entre valores de reflectância superiores ou inferiores aos da cor telha mas, quando o comprimento de onda é superior a 700 nm, verifica-se um crescimento acentuado dos valores de reflectância.

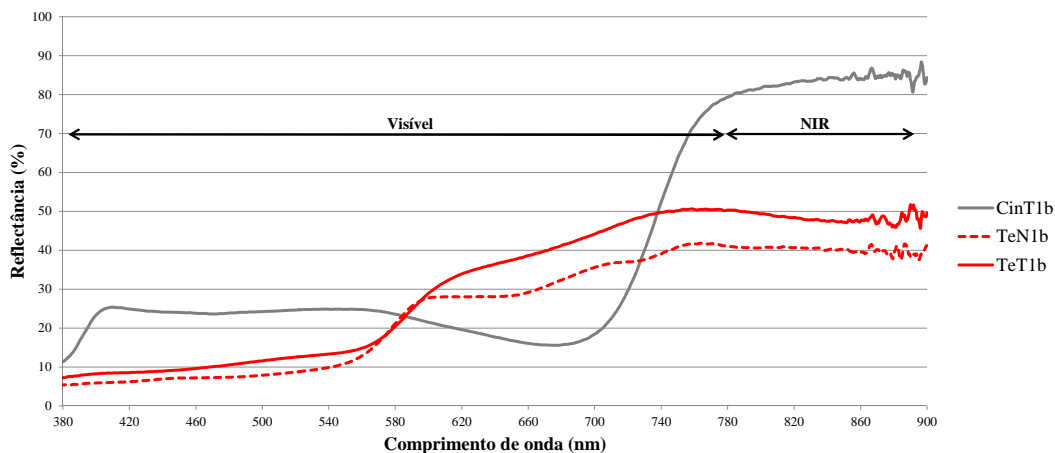


Fig. 5.2: Curvas espectrais de reflectância para provetes de cor telha e cinza do tipo 1

O crescimento acentuado do valor de reflectância a partir do comprimento de onda de 700 nm também se verifica no provete PrT, percebendo-se que a cor cinza beneficia da boa reflectância das cores PrT e BrT no infravermelho próximo. No Visível não é prejudicada visto ser uma cor mais clara devido à mistura com a cor BrT.

Assim, a cor cinza surge como uma alternativa à cor telha pois apresenta valores de reflectância superiores no NIR, possibilitando o melhoramento do desempenho térmico da parede e, do ponto de vista estético, apresenta-se como uma opção estética diferente das três cores reflectantes já existentes.

Verifica-se igualmente que, a tinta reflectante de cor telha (proвете TeT1b), apresenta valores de reflectância superiores ao da tinta convencional (proвете TeN1b) no intervalo espectral avaliado, permitindo comprovar que a tinta reflectante melhora o comportamento reflectivo do suporte, independentemente da cor.

No gráfico da figura 5.1 é igualmente possível observar que, na região do visível, a cor preta, independentemente de ser tinta reflectante ou não, mantém um valor de reflectância sensivelmente constante e baixo, como seria de prever.

À medida que aumenta o comprimento de onda e se aproxima do infravermelho próximo, as propriedades dos elementos constituintes da tinta preta reflectante originam o crescimento acentuado da reflectância espectral do provete PrT1b, traduzindo a selectividade espectral, que se verificou neste tipo de tintas.

Observa-se que o provete PrN1b, pintado com tinta preta convencional, apresenta valores de reflectância muito baixos ($\approx 5\%$), que se mantêm praticamente constantes ao longo de toda a gama de comprimentos

de onda analisada. A constância do valor baixo de reflectância ao longo de todo o comprimento de onda evidencia que o provete PrN1b tem um comportamento que se aproxima do comportamento de um corpo negro.

A cor preta permite visualizar claramente a melhoria da reflectância de uma tinta convencional para reflectante, sendo a região do infravermelho próximo a que apresenta maiores valores de reflectância. Salienta-se que grande parte da radiação solar é infravermelha próxima ($\approx 50\%$), revelando assim a importância que este tipo de tinta pode ter no desempenho térmico de uma habitação.

Observando as curvas espectrais das cores extremas (figura 5.3), é possível identificar que, em ambas, existe uma melhoria do valor da reflectância. No caso da cor branca essa melhoria é evidente em toda a gama de comprimentos de onda, enquanto que na cor preta apenas ocorre a partir dos 700 nm.

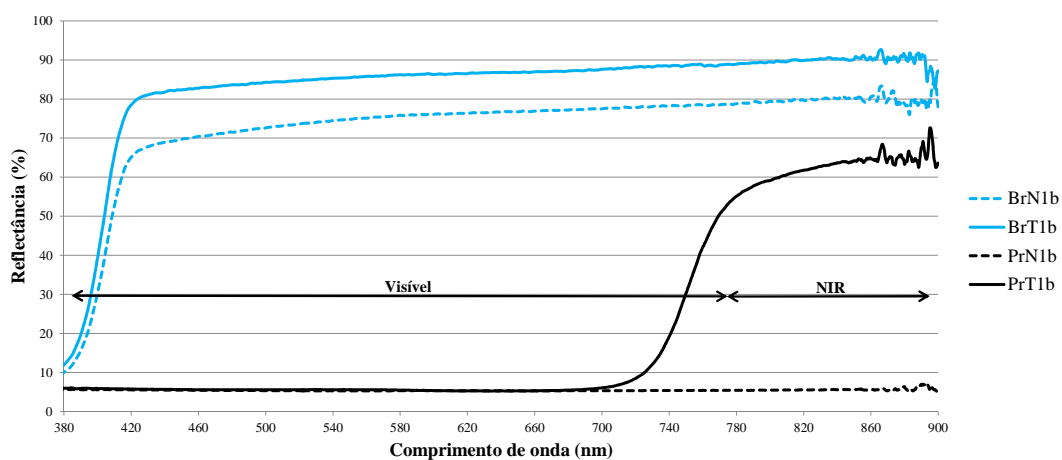


Fig. 5.3: Curvas espectrais de reflectância para provetes de cores extremas do tipo 1

Desta forma é perceptível porque não é recomendado pintar ou aplicar materiais de coloração escura em fachadas de edifícios. Valores muito baixos de reflectância traduzem-se em valores elevados de absorção de radiação solar, o que implica um maior fluxo de calor para o interior das habitações (situação indesejável em período de Verão).

Segundo a norma ASTM E 903 [ASTM, 2012a], para avaliar a reflectância, neste caso, no intervalo 380 nm a 900 nm, é necessário fazer a média dos valores da reflectância em determinados comprimentos de onda, que se traduz na seguinte equação:

$$\rho = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad (5.1)$$

Se o intervalo corresponde à radiação solar, denomina-se como reflectância solar total (TSR - Total Solar Reflectance), calculando-se da mesma forma:

$$TSR = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) \quad (5.2)$$

Considerando apenas o intervalo 380 nm a 780 nm (região do visível), apresentam-se no quadro 5.1, os valores da reflectância total (ρ_{total}) dos provetes rugosos, segundo a expressão 5.1.

Quadro 5.1: Reflectância total dos provetes do tipo 1 no Visível

Tipo	Proвете	$\rho_{total} (\%)$
Rugoso	BrN1b	70,9
Rugoso	BrT1b	81,5
Rugoso	BrR1b	80,9
Rugoso	BrPr1b	81,4
Rugoso	PrN1b	5,4
Rugoso	PrT1b	9,5
Rugoso	TeN1b	20,8
Rugoso	TeT1b	25,9
Rugoso	CinT1b	27,5

Em todas as cores, os provetes pintados com tinta reflectante (T) apresentam valores superiores de reflectância total comparativamente a provetes idênticos mas com tinta convencional (N) aplicada. Verifica-se que, tanto o provete BrR1b como o BrPr1b, apresentam valores de reflectância total semelhantes ao provete BrT1b, pintado com tinta branca reflectante.

Na cor preta já é perceptível a disparidade entre a tinta reflectante e convencional, obtendo-se uma diferença de aproximadamente 4% de reflectância total, sem ainda ter sido avaliada a região onde varia mais, isto é, o infravermelho próximo. Este facto é especialmente relevante visto tratar-se de uma cor preta. Tratando-se da região do visível percebem-se os valores obtidos, visto que para cores mais claras obtém-se valores mais elevados de reflectância total e para cores escuras este valor é inferior.

De seguida apresentam-se no quadro 5.2 os valores da reflectância total (ρ_{total}) dos provetes rugosos no intervalo 380 nm a 900 nm, segundo a expressão 5.1:

Quadro 5.2: Reflectância total dos provetes do tipo 1 no Visível - Infravermelho próximo

Tipo	Proвете	$\rho_{total} (\%)$
Rugoso	BrN1b	72,9
Rugoso	BrT1b	83,4
Rugoso	BrR1b	83,2
Rugoso	BrPr1b	82,8
Rugoso	PrN1b	5,5
Rugoso	PrT1b	21,7
Rugoso	TeN1b	25,3
Rugoso	TeT1b	31,1
Rugoso	CinT1b	40,4

Como esperado, verificam-se valores mais elevados de reflectância total nos provetes pintados com tinta reflectante, pelo facto da região espectral analisada incluir agora o infravermelho próximo. Os dados obtidos permitem perceber que a constituição física e química da tinta reflectante, principalmente ao nível do tipo e dimensão do pigmento usado, permite aumentar a reflectância da superfície quando irradiada por radiação com comprimentos de onda superiores a 700 nm.

Um bom exemplo da selectividade espectral que a tinta reflectante evidencia obtém-se com a cor preta reflectante (proвете PrT1b). Este provete apresenta um valor da reflectância total na região do visível

(380 nm a 780 nm) de 9,5 % (quadro 5.1) mas, quando o intervalo de comprimento de onda é ampliado até aos 900 nm, este valor aumenta aproximadamente 128 %, cifrando-se em 21,7 % (quadro 5.2) de reflectância total.

Verifica-se que até ao comprimento de onda de 700 nm os valores de reflectância são em parte, função das propriedades intrínsecas da matéria, isto é, da cor da superfície (clara ou escura) e função do tipo de tinta (reflectante ou convencional) para comprimentos de onda mais elevados. Torna-se evidente que a diferença entre a reflectância de tintas reflectantes e convencionais, a partir do comprimento de onda de 700 nm, é tão mais acentuada, particularmente, se a cor da superfície for mais escura.

Observando os resultados obtidos pelo provete BrPr1b (quadro 5.1 e 5.2), verifica-se que a cor da base não influencia a reflectância total, não se registando diferenças consideráveis quando comparado com o provete BrT1b (independentemente do intervalo espectral analisado).

Faixa espectral

Apesar da região analisada estar balizada a um comprimento de onda de 900 nm (devido a limitações do espectrofotómetro utilizado), foi possível avaliar o comportamento das tintas além do referido comprimento de onda. Tendo em conta a tendência das curvas prevê-se que no mínimo, os valores máximos de reflectância espectral se manterão e talvez a reflectância total no espectro total da radiação solar, ou TSR, aumente.

Percebendo a necessidade de avaliar uma faixa maior do espectro electromagnético, que englobasse a radiação solar, recorreu-se aos resultados do ensaio de espectrofotometria elaborado pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) [FEUP, 2013]. O ensaio avaliou apenas a tinta reflectante nas três cores disponíveis: branco, telha e preto da mesma marca de tinta estudada no âmbito deste trabalho.

Os resultados obtidos na FEUP (figura 5.4) permitem, por um lado, validar os resultados obtidos no âmbito deste trabalho e avaliar o comportamento que este tipo de tinta (reflectante) apresenta em todo o espectro da radiação solar (exceptuando a radiação ultravioleta).

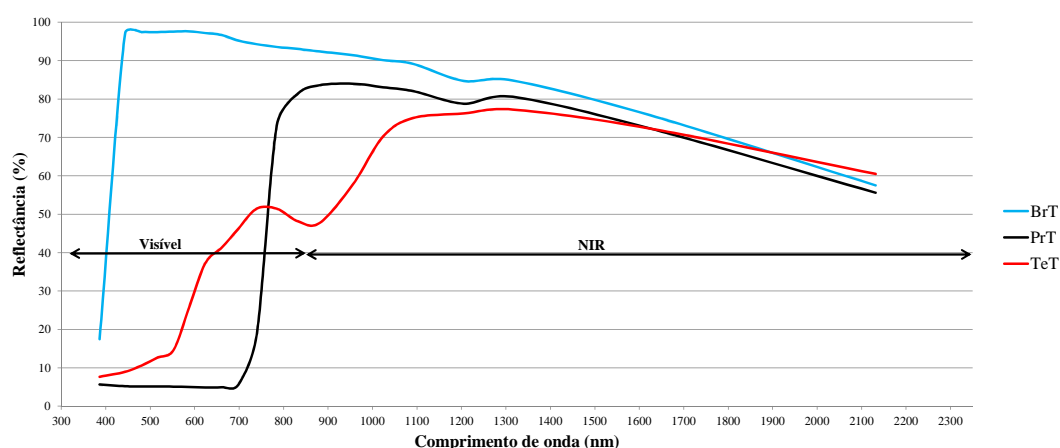


Fig. 5.4: Curvas espectrais de reflectância para cores reflectantes - dados FEUP [FEUP, 2013]

É possível verificar que as três cores, à medida que se avança para comprimentos de onda maiores, tendem para o mesmo valor de reflectância, indicando que, a partir de um determinado comprimento de

onda (≈ 1700 nm), estas têm o mesmo comportamento, não sendo relevante a cor. Percebe-se assim que a cor é preponderante na região do visível, não tendo influência para comprimentos de onda maiores (região do infravermelho).

No quadro 5.3 é possível fazer a comparação da reflectância total no Visível e solar (TSR), tendo como base os dados da FEUP [FEUP, 2013].

Quadro 5.3: Reflectância total Visível e Solar (TSR) - dados FEUP [FEUP, 2013]

Cor	ρ_{VIS} (%)	ρ_{TSR} (%)	$\Delta\rho_{total}$ (%)
Branco	89,2	87,0	-2,2
Telha	28,0	44,7	16,7
Preto	12,5	42,0	29,4

A tendência verificada anteriormente também é evidenciada no ensaio da FEUP, ocorrendo um aumento da reflectância total quando se compara a região do visível (VIS) com a radiação solar (TSR). Na cor branca este aumento não é verificado, ocorrendo até uma ligeira diminuição da reflectância total.

Esta situação deve-se ao facto da região espectral analisada incluir agora o infravermelho próximo completo e uma pequena parte do infravermelho médio. Neste último, a cor branca começa a diminuir o seu valor de reflectância de forma mais acentuada, enquanto as cores mais escuras apresentam um crescimento inicial elevado quando sujeitas a radiação de infravermelho, em especial a cor preta.

Os dados fornecidos por este ensaio permitem perceber que as tintas reflectantes apresentam valores elevados de reflectância total ao longo do espectro da radiação solar, em especial, na região do infravermelho próximo.

Tipo de superfície

Na secção 2.4 referiu-se que um dos factores que influencia a reflectância é a rugosidade ou o tipo de superfície. Nesse sentido, as mesmas tintas foram aplicadas num suporte diferente (superfície lisa), sendo assim possível determinar a influência que o tipo de superfície tem na reflectância de um material. Efectuou-se novamente a análise espectrofotométrica dos provetes rugosos e, de seguida, dos lisos, garantindo uma maior fiabilidade dos resultados, mantendo a mesma leitura do padrão ou “baseline”.

Como todos os provetes ensaiados apresentaram a mesma tendência, na figura 5.5 apresenta-se apenas a análise da cor branca. Com este gráfico pretende-se verificar a influência da rugosidade na reflectância no intervalo de comprimento de onda analisado (380 a 900 nm).

O gráfico da figura 5.5 apresenta então as curvas espectrais de reflectância de quatro provetes de cor branca: BrT1b, BrT2, BrN1b e BrN2. Observa-se que os provetes lisos (BrT2 e BrN2), independentemente de serem reflectantes ou não, apresentam maiores valores de reflectância espectral.

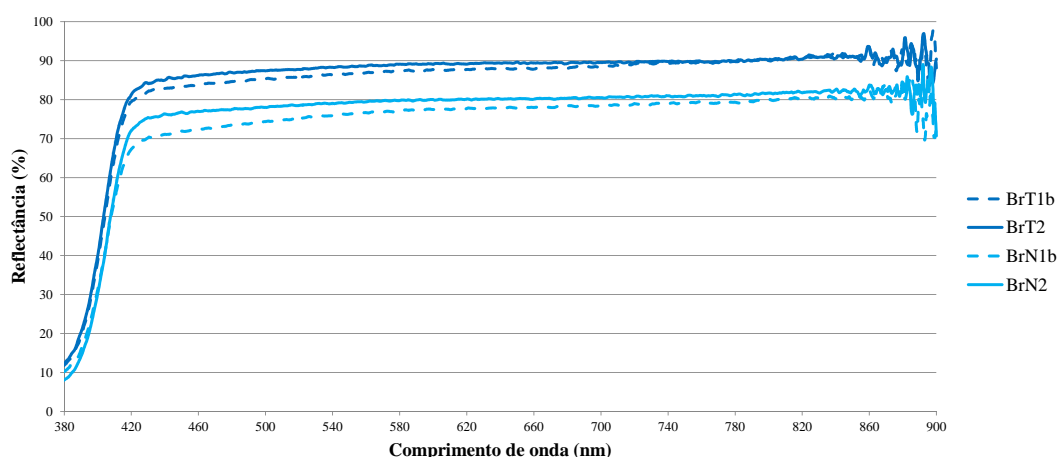


Fig. 5.5: Curvas espectrais de reflectância para provetes de cor branca lisos e rugosos

Calculando a reflectância total para o intervalo estudado, obtêm-se os valores apresentados no quadro 5.4:

Quadro 5.4: Reflectância total dos provetes BrN1b, BrN2, BrT1b e BrT2

Tipo	Provette	ρ_{total} (%)
Liso	BrT2	85,4
	BrN2	76,4
Rugoso	BrT1b	84,3
	BrN1b	74,0

Os resultados obtidos permitem concluir que o tipo de superfície afecta o valor da reflectância total mas não permitem aferir a preponderância que esta pode ter no desempenho térmico efectivo da habitação. O facto da diferença de valores entre rugoso e liso ser muito reduzida, contribui para a afirmação anterior. Embora uma superfície lisa apresente um valor mais elevado de reflectância, a diferença para a superfície rugosa é mínima, sendo de 1,1 % para o BrT e 2,4 % no BrN.

Esfera integradora

O ensaio da esfera integradora permite determinar a reflectância total (ρ_{total}) de cada provete, na faixa espectral correspondente ao Visível (380 nm a 780 nm). Os valores finais de reflectância total dos provetes rugosos (tipo 1) resultam da média dos provetes *a* e *b* e os provetes lisos (tipo 2), dos valores directos de cada provete.

Embora sejam ensaios diferentes, os resultados obtidos pela esfera integradora servem de comparação com os resultados obtidos no ensaio de espectrofotometria (secção 5.2.1), para a região do visível.

No quadro 5.5 apresentam-se os valores de reflectância total dos provetes com superfície rugosa. Estes valores são resultado da integração na faixa espectral de comprimento de onda avaliada (380 nm a 780 nm).

Quadro 5.5: Valores de reflectância total dos provetes rugosos

Tipo	Proвете	$\rho_{total} (\%)$
Rugoso	BrN1	76,8
Rugoso	BrT1	88,9
Rugoso	BrR1	88,7
Rugoso	BrPr1	87,8
Rugoso	PrN1	4,8
Rugoso	PrT1	5,0
Rugoso	TeN1	19,3
Rugoso	TeT1	21,2
Rugoso	CinT1	23,2

O quadro 5.6 apresenta os valores de reflectância total dos provetes de superfície lisa ensaiados.

Quadro 5.6: Valores de reflectância total dos provetes lisos

Tipo	Proвете	$\rho_{total} (\%)$
Liso	BrN2	85,3
Liso	BrT2	89,4
Liso	BrR2	84,2
Liso	PrT2	4,8
Liso	TeN2	19,7
Liso	TeT2	21,5
Liso	CinT2	23,4

Tipo de superfície

Analisando os resultados obtidos em ambas as superfícies (quadro 5.5 e quadro 5.6) conclui-se que não existe grande diferença entre os valores de reflectância total entre provetes lisos e rugosos. A única excepção é a cor BrN, correspondente ao branco convencional. Este revestimento espesso granular de cor branca quando é aplicado num suporte liso, não adere de forma tão eficaz como uma tinta, não cobrindo eficazmente todo o suporte. Quando é aplicado ao suporte rugoso a aderência é muito superior, permitindo uma melhor cobertura da superfície. Este facto explica o valor superior de reflectância total do provete BrN2 visto expor a superfície metálica à luz incidente, melhorando o seu desempenho reflectante.

Os valores obtidos na esfera integradora tendem a serem ligeiramente superiores em superfícies lisas exceptuando nos provetes BrR2 e PrT2. Tendo em conta que se pretende avaliar a influência do tipo de superfície na reflectância de uma superfície, os resultados obtidos não surpreendem ou são conclusivos, visto que a diferença é mínima. Tal como no ensaio de espectrofotometria (secção 5.2.1) constatou-se que as diferenças entre provetes de superfície lisa não apresentavam variações significativas do valor de reflectância no Visível, quando comparados com provetes de superfície rugosa.

Este facto pode ser explicado pelo carácter instantâneo das medições e pela forma como se processa o ensaio. O feixe de luz incide sempre com o mesmo ângulo, não havendo variação deste ângulo, excluindo assim parte da influência que a rugosidade pode ter no comportamento reflectante da superfície.

Na figura 5.6 apresenta-se a reflectância total da tinta branca convencional (BrN) e branca reflectante (BrT) quando aplicadas numa superfície rugosa (tipo 1) e lisa (tipo 2).

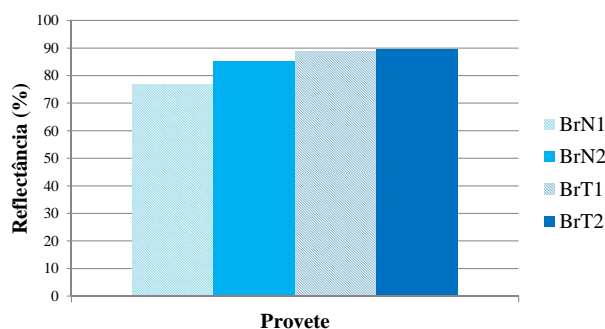


Fig. 5.6: Comparação da reflectância total para provetes BrN e BrT

A diferença reduzida que se observa entre os provetes BrT1 e BrT2 deve-se ao facto da tinta reflectante cobrir bem as irregularidades da superfície, originando uma superfície mais uniforme. Obtém-se assim, valores de reflectância próximos dos obtidos para o provete liso.

Cor e Tipo de tinta

Analisando os resultados obtidos relativamente à cor e focando a análise nos provetes rugosos reflectantes (figura 5.7), constata-se que os pintados de cor mais clara (branco) apresentam valores de reflectância no Visível muito superiores a cores mais escuras, como a cor preta, telha ou cinza. Os resultados obtidos são os espectáveis, congruentes com o que se verificou no ensaio de espectrofotometria (5.2.1). A mesma situação é verificada nos provetes lisos, reflectantes e convencionais.

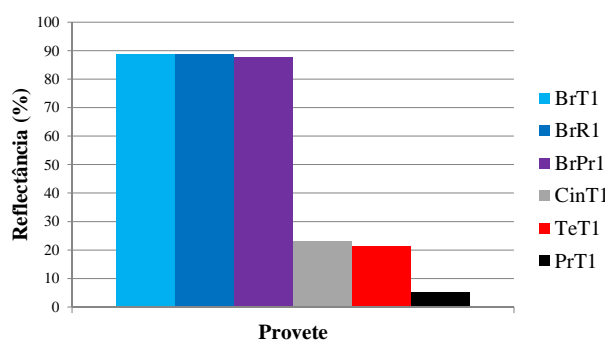


Fig. 5.7: Comparação da reflectância total para diferentes cores

Na figura 5.7 observa-se que as cores mais escuras, como o preto, apresentam valores mais reduzidos de reflectância porque pigmentos coloridos absorvem mais energia em certos comprimentos de onda, diminuindo a componente reflectida. O inverso verifica-se nas cores mais claras, como o branco. No catálogo actual de cores disponíveis do fabricante das tintas reflectantes ensaiadas apenas existe branco, preto e telha. Tal como anteriormente já referido, decidiu-se criar uma cor alternativa, neste caso cinza reflectante, resultado da mistura 50/50 do branco e preto reflectantes. Num patamar intermédio entre as cores extremas (branco e preto), surgem assim as cores telha e cinza. Verifica-se que a cor cinza apresenta valores de reflectância superiores aos obtidos para a cor telha.

Os resultados obtidos não surpreendem, sendo congruentes com os de outros ensaios realizados

no âmbito deste trabalho (secção 5.2.1 - Espectrofotometria e secção 5.2.2), sendo produto das características físicas e químicas das tintas aplicadas, na faixa do espectro analisada: Visível.

O ensaio da esfera integradora permitiu determinar a reflectância total dos vários provetes e avaliar a diferença de uma tinta reflectante para uma tinta convencional da mesma cor. Neste ensaio utilizaram-se provetes de diferentes cores (branco, telha, cinza e preto), superfícies (rugosa e lisa) e tipos de tinta (reflectante, convencional e revestimento térmico). Tendo em conta o tipo de tinta obtiveram-se as seguintes diferenças, apresentadas no quadro 5.7.

Quadro 5.7: Comparação da reflectância total para diferentes tipos de tinta da mesma cor

Proвете	$\rho_{\text{total}} (\%)$	$\Delta\rho_{\text{total}} (\%)$
BrN1	76,8	12,0
BrT1	88,9	
PrN1	4,8	0,20
PrT1	5,0	
TeN1	19,3	2,0
TeT1	21,2	
BrR1	88,7	-

No quadro 5.7 verifica-se um aumento de reflectância quando se tem uma tinta reflectante (T) em vez de uma convencional (N), da mesma cor. Este aumento é maior na tinta de branca, sendo que a cor preta e telha não apresentam grandes diferenças. Constata-se que o revestimento térmico ensaiado, correspondente ao provete BrR1, apresenta um valor de reflectância muito próximo do obtido pelo provete BrT1 (reflectante) e comprova os resultados obtidos no ensaio anterior (espectrofotometria).

5.2.2 Reflectância direcciona

Em condições controladas de laboratório realizou-se o ensaio de reflectância direcciona, que permitiu determinar, na região do visível, a reflectância direcciona de tintas reflectantes e convencionais, de várias cores e aplicadas em suportes diferentes. Diferenciaram-se os resultados em termos de ângulo de incidência da luz, tipo de superfície, cor e tipo de tinta.

Desta forma, a influência que o ângulo de incidência da luz e tipos de superfície (lisos ou rugosos) têm no comportamento reflectivo da tinta é avaliada, conforme descrito na secção 4.2.1. Os resultados obtidos demonstram a variação da reflectância consoante o ângulo de incidência.

Para perceber essa influência, considera-se relevante definir a diferença entre dois conceitos: irradiância e iluminância [RYER, 1998]

- Irradiância é uma medida do fluxo radiométrico por unidade de área, ou a densidade de fluxo de radiação que incide numa superfície, expressa tipicamente em W/m^2 .
- Iluminância é uma medida do fluxo fotométrico por unidade de área, ou densidade de fluxo visível e é normalmente expressa em lux (lumen/m^2).

Tratando-se de uma fonte luminosa (lâmpada) que produz radiação para comprimentos de onda da região do visível (luz), define-se a luz que incide no provete como iluminância e a que é reflectida deste como luminância.

Comparando-se os resultados obtidos para comprimentos de onda da região do visível, a cor do provete revela ser um factor importante na capacidade de reflexão, assim como a rugosidade e ângulo de incidência. Tal como foi referido na secção 4.2.1, avaliaram-se vários provetes, de cor e superfície diferentes, obtendo-se a reflectância para cada ângulo ensaiado. Como a reflectância obtida neste ensaio depende directamente do ângulo, determinou-se a reflectância direccional.

Ângulo de incidência da luz

O ângulo de incidência é formado entre a fonte luminosa e o luminómetro, avaliando-se a reflectância dos provetes para cada ângulo. Pretendeu-se determinar a variação deste valor à medida que a luz é mais ou menos rasante à superfície.

Na figura 5.8 apresenta-se a evolução dos valores de reflectância para os vários provetes rugosos.

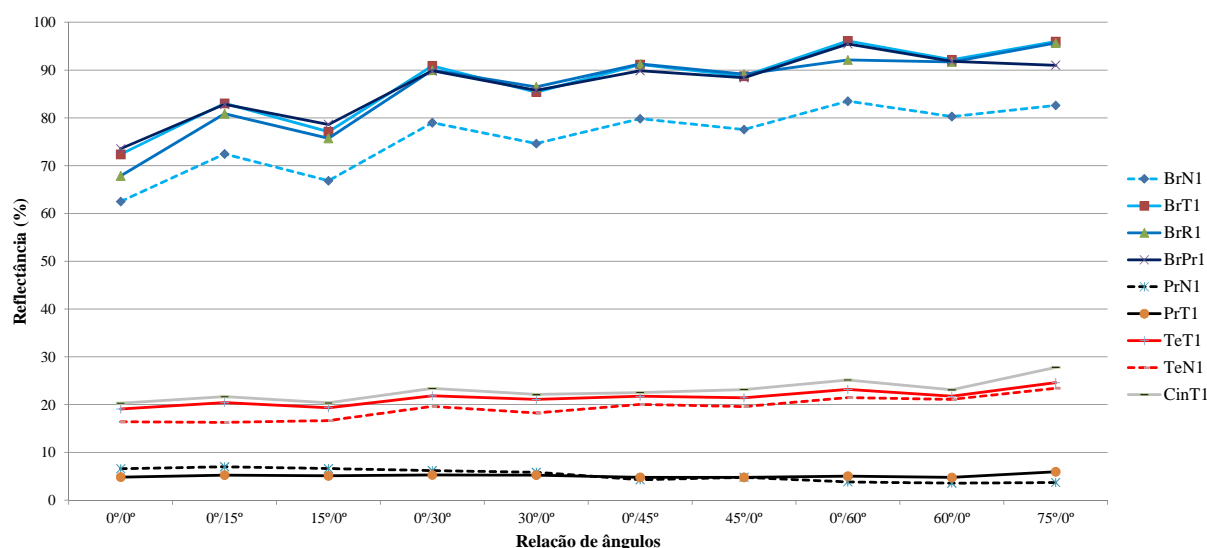


Fig. 5.8: Valores de reflectância para provetes rugosos

Para cada relação de ângulo, isto é, quando o provete é perpendicular à fonte luminosa ($0^\circ/X^\circ$) e quando este é perpendicular ao luminómetro ($X^\circ/0^\circ$) são medidas e calculadas as reflectâncias direccionais.

Observa-se que os provetes de cor mais clara apresentam valores de reflectância mais elevados que os mais escuros. Verifica-se também que existe uma menor variação da reflectância com o aumento do ângulo, nos provetes mais escuros e maior nos mais claros. Os resultados destacados acima resultam do facto da superfície ser iluminada por luz visível, sendo a cor um factor determinante no comportamento reflectante das superfícies nesta faixa espectral. Confirma-se, assim, a tendência observada em outros ensaios (secção 5.2.1- Espectrofotometria e Esfera integradora), de tintas reflectantes apresentarem valores de reflectância superiores aos de tintas convencionais.

Tomando como exemplo as cores extremas (branco e preto), apresenta-se na figura 5.9, o gráfico dos valores de reflectância ao longo dos vários ângulos para os provetes BrT1, BrN1, PrT1 e PrN1.

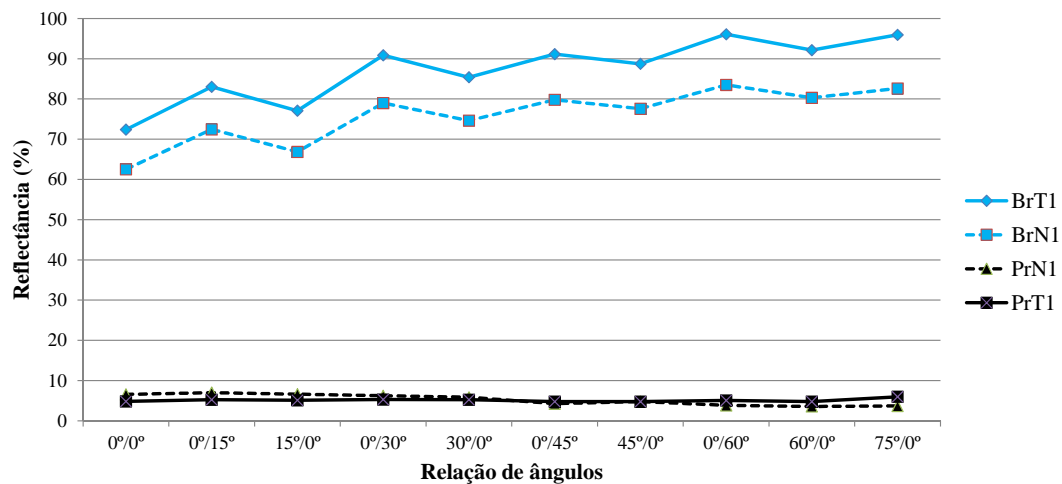


Fig. 5.9: Valores de reflectância para provetes rugosos de cor branca e preta

A oscilação dos valores de reflectância observada na figura 5.9, principalmente em cores mais claras, deve-se ao facto de, para cada ângulo existirem duas medições. Separando os resultados em dois quadros, um quando o provete é perpendicular à fonte luminosa ($0^\circ/X^\circ$) e outro quando este é perpendicular ao luminómetro ($X^\circ/0^\circ$), é possível constatar que, quando a luz incide perpendicularmente ao provete, obtém-se valores de reflectância mais elevados (quadro 5.8), independentemente do ângulo.

Quadro 5.8: Valores de reflectância para medições ($0^\circ/X^\circ$)

$0^\circ/X^\circ$	ρ_θ (%)			
	BrN1	BrT1	PrN1	PrT1
$0^\circ/0^\circ$	62,5	72,4	6,6	4,8
$0^\circ/15^\circ$	72,5	83,0	7,0	5,3
$0^\circ/30^\circ$	79,0	90,9	6,2	5,3
$0^\circ/45^\circ$	79,8	91,2	4,3	4,8
$0^\circ/60^\circ$	83,5	96,1	3,8	5,1

Observa-se que, para qualquer relação de ângulos ou provete, o quadro 5.8 apresenta valores superiores de reflectância, comparando com o quadro 5.9.

Quadro 5.9: Valores de reflectância para medições ($X^\circ/0^\circ$)

$X^\circ/0^\circ$	ρ_θ (%)			
	BrN1	BrT1	PrN1	PrT1
$0^\circ/0^\circ$	62,5	72,4	6,6	4,8
$15^\circ/0^\circ$	66,8	77,1	6,6	5,1
$30^\circ/0^\circ$	74,6	85,4	5,8	5,3
$45^\circ/0^\circ$	77,6	88,7	4,8	4,8
$60^\circ/0^\circ$	80,3	92,2	3,6	4,8
$75^\circ/0^\circ$	82,6	96,0	3,7	6,0

Os resultados obtidos indicam que quando a luz incide perpendicularmente à superfície do provete, esta reflecte mais, aumentando o valor de reflectância à medida que se incrementa o ângulo.

Esta situação é em parte explicada pela Lei do co-seno de Lambert [RYER, 1998]. A figura 5.10 exemplifica a forma como a iluminância varia com o co-seno do ângulo de incidência.

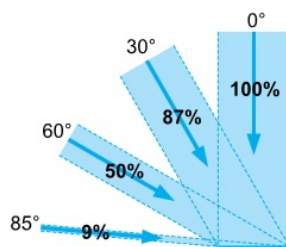


Fig. 5.10: Iluminância em função do co-seno do ângulo de incidência adaptado de [RYER, 1998]

A figura 5.10 também pode ser traduzida pela seguinte equação:

$$I_{\theta} = I \cdot \cos(\theta) \quad (5.3)$$

em que

- I_{θ} é a iluminância para um determinado ângulo θ ;
- I é a iluminância para $\theta = 0^{\circ}$.

A equação 5.3 indica que a iluminância num ponto de um plano é proporcional ao co-seno do ângulo de incidência da luz, isto é, o ângulo entre a direcção da luz e a perpendicular ao plano. A lei do co-seno explica os valores mais elevados de reflectância do quadro 5.8, pois a luz incide na perpendicular, iluminando com mais intensidade a superfície. Para ângulos mais oblíquos, o fluxo de luz incidente é mais reduzido, obrigando a luz a espalhar-se por uma área maior.

Os quadros 5.10 e 5.11 apresentam os valores de luminância medidos pelo luminómetro para cada relação de ângulos, para os provetes convencionais e reflectantes, de cor branca e de cor preta.

Quadro 5.10: Valores de luminância para medições ($0^{\circ}/X^{\circ}$)

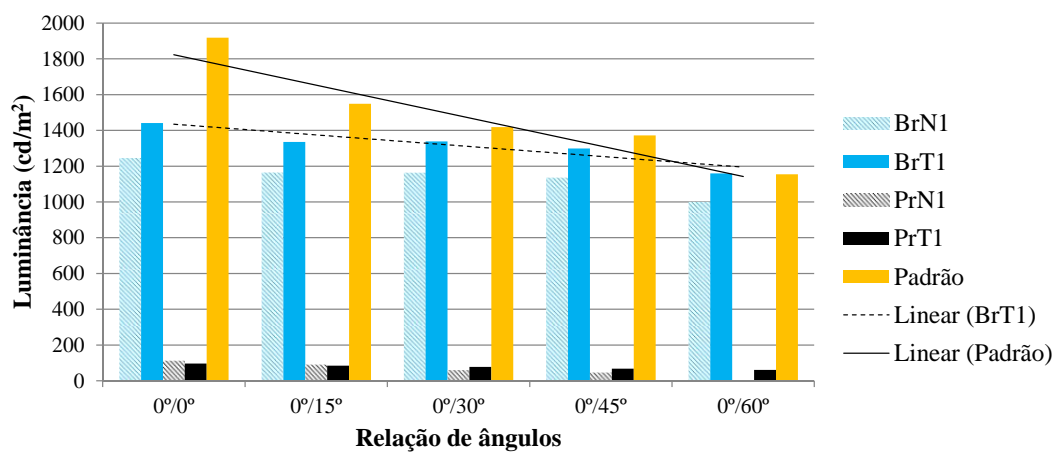
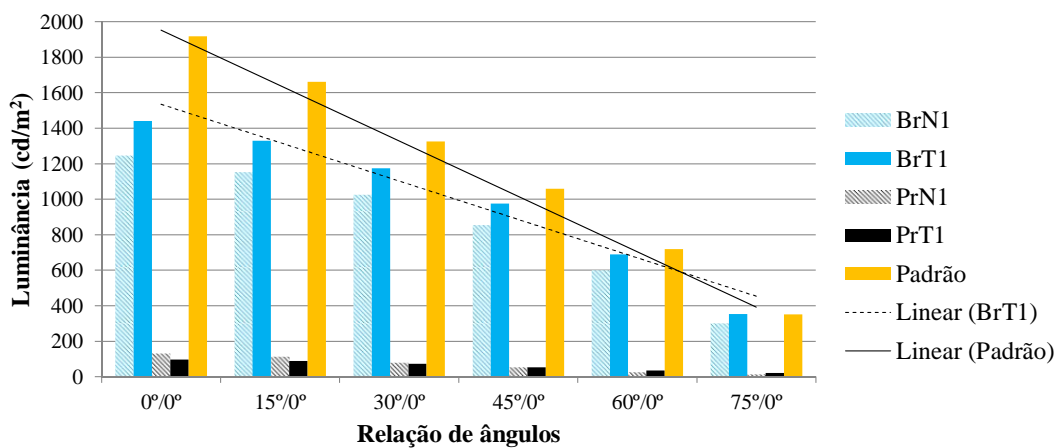
$0^{\circ}/X^{\circ}$	L (cd/m ²)				
	BrN1	BrT1	PrN1	PrT1	Padrão
$0^{\circ}/0^{\circ}$	1245	1441,5	131	96,5	1918,3
$0^{\circ}/15^{\circ}$	1165	1335	112,5	84,5	1548,3
$0^{\circ}/30^{\circ}$	1163,5	1338,5	91,5	78	1418,3
$0^{\circ}/45^{\circ}$	1136,5	1298,5	61	68	1372,0
$0^{\circ}/60^{\circ}$	1001,5	1160	46	61	1155,0

Como referido anteriormente, pela lei do co-seno de Lambert, existe uma maior iluminância do provete quando este é perpendicular à fonte luminosa, o que, para condições idênticas, se traduz numa maior luminância, como demonstrado pelos resultados do quadro 5.10.

Quadro 5.11: Valores de luminância para medições ($X^\circ/0^\circ$)

$L \text{ (cd/m}^2\text{)}$					
$X^\circ/0^\circ$	BrN1	BrT1	PrN1	PrT1	Padrão
$0^\circ/0^\circ$	1245	1441,5	131	96,5	1918,3
$15^\circ/0^\circ$	1153,5	1330	114	88,5	1661,7
$30^\circ/0^\circ$	1027	1175	80,5	72,5	1325,0
$45^\circ/0^\circ$	852,5	975	52,5	52,5	1058,3
$60^\circ/0^\circ$	600	688,5	26,5	36	719,7
$75^\circ/0^\circ$	301,5	352,5	13,5	22	351,5

Nas figuras 5.11 e 5.12 apresenta-se a variação da luminância consoante a relação de ângulos.

Fig. 5.11: Valores de luminância para medições ($0^\circ/X^\circ$)Fig. 5.12: Valores de luminância para medições ($X^\circ/0^\circ$)

Constata-se que a luminância diminui com o aumento do ângulo. À medida que se aumenta o ângulo de incidência da luz, a luminância dos provetes não decresce tão acentuadamente como a do padrão, como é possível observar nas linhas de tendência das figuras 5.11 e 5.12.

Observando a linha de tendência do BrT1 da figura 5.11, verifica-se que a luminância apresenta um valor

praticamente constante ao longo dos ângulos avaliados. Significa que a superfície dos provetes apresenta um comportamento semelhante a uma superfície Lambertiana. Este tipo de superfície apresenta uma difusão uniforme da radiação incidente, de tal forma que a luminância é a mesma em todas as direcções a partir da qual esta pode ser medida [RYER, 1998]. Mas neste caso a superfície dos provetes não é totalmente difusa, apresentando valores diferentes de luminância nas várias direcções.

O facto das medições $X^0/0^0$ apresentarem valores menores de reflectância está relacionado com a forma como foram efectuadas as medições. Como a luz não incide perpendicularmente ao provete, obtêm-se luminâncias menores (figura 5.12) e, consequentemente, menores valores de reflectância (quadro 5.9).

A reflectância é calculada tendo em conta a luz que é reflectida pela superfície do provete, em função do valor obtido pelo padrão de reflectância. Quanto mais rasante a luz, maior será a componente reflectida pela superfície, que depende das características físicas e químicas da tinta que está aplicada, do tipo de superfície e cor.

Na figura 5.13 é possível observar, para o provete TeT1, o efeito que um ângulo mais ou menos oblíquo (entre a fonte luminosa e o observador) tem na luz que é captada pelo luminómetro.

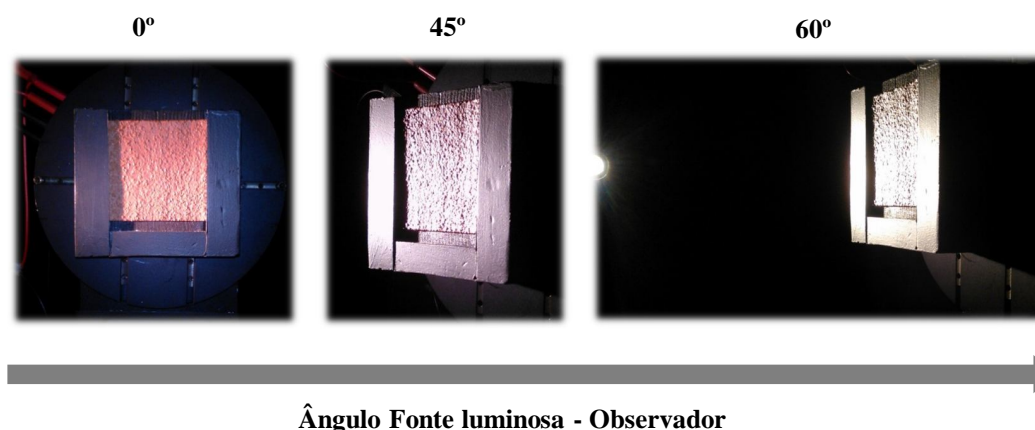


Fig. 5.13: Variação do ângulo fonte luminosa - observador

Se a superfície fosse especular (vidro), o ângulo com que a luz incide seria igual ao ângulo com que esta é reflectida. Mas como a superfície é difusa, esta vai reflectir em várias direcções, sendo que, quando mais próximo o observador estiver do ângulo (em que o raio de luz reflectido é igual ao incidente), maiores vão ser os valores de reflectância.

Tipo de superfície

O conforto térmico no interior de uma habitação está intimamente ligado com o ganho de calor através dos paramentos exteriores, devido à incidência de radiação solar. Quando a radiação solar incide sobre uma superfície opaca, parte da radiação é absorvida e a restante reflectida. A parcela de radiação que é absorvida provoca um aumento da temperatura superficial, ocorrendo um fluxo de calor para o interior (período de Verão). A variação de cada uma das parcelas (reflectida e absorvida) afecta directamente a outra, variando consoante as características e estado da superfície, como a cor, rugosidade, humidade e estrutura do material [D.SEKER, 1996].

Para uma melhor caracterização da reflectância dos vários tipos de tintas, criaram-se dois tipos de provetes: provetes de superfície rugosa (tipo 1) e provetes de superfície lisa (tipo 2). Tal como foi descrito

na secção 4.2.1 os provetes de superfície rugosa pretendem simular o caso de estudo *in situ* deste trabalho (secção 4.2.2), sendo que os provetes de superfície lisa servem de comparação, aferindo a influência que uma superfície mais ou menos rugosa tem no desempenho reflectivo.

O nível de rugosidade da superfície é importante para a reflectância do material. Quanto mais rugosa for a superfície, maior é a probabilidade de que os raios solares sejam reflectidos a partir de qualquer ponto da superfície, aumentando também a probabilidade do mesmo raio atingir novamente a superfície [D.SEKER, 1996]. Assim sendo, a superfície absorve mais energia, reflectindo menos.

É importante frisar que o ensaio efectuado apenas avalia a região do espectro correspondente ao Visível, sendo as conclusões obtidas válidas apenas para esta faixa espectral. Obtém-se mesmo assim uma boa aproximação do comportamento espectável no exterior, visto o Visível constituir uma parcela importante da radiação solar.

Na figura 5.14 compara-se para duas cores (BrT e PrT), a reflectância quando a base é lisa (provetes BrT2 e PrT2) e rugosa (provetes BrT1 e PrT1).

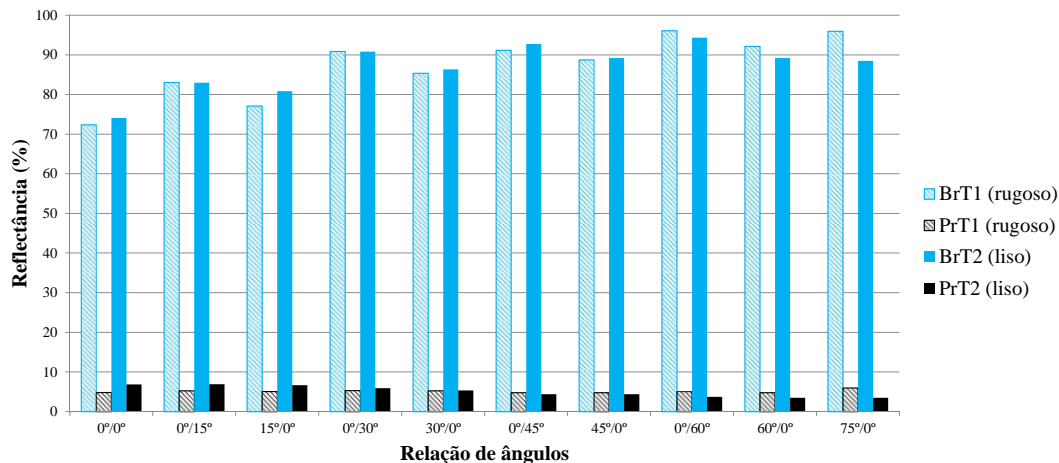


Fig. 5.14: Reflectância de uma superfície lisa e rugosa

Analisando o gráfico (figura 5.14), verifica-se que não existe uma grande variação dos valores de reflectância, quando se compara a superfície lisa e rugosa da mesma cor. Este facto é explicado, em parte, pela aplicação de tinta como acabamento final. A aplicação da tinta torna a superfície menos irregular, diminuindo a rugosidade do suporte.

A média dos valores de reflectância para medições 0°/X° em todos os ângulos para provetes rugosos (tipo 1) e lisos (tipo 2) de cores preta e branca reflectantes é de:

- BrT1 = 86,7 %
- BrT2 = 87,0 %
- PrT1 = 5,0 %
- PrT2 = 5,6 %

Observa-se que uma superfície menos rugosa apresenta uma reflectância mais elevada, embora as diferenças sejam marginais. Efectuando a média da reflectância para todas as medições ($0^\circ/X^\circ$ e $X^\circ/0^\circ$) em todos os ângulos para os provetes preto e branco reflectante, obtém-se os seguintes resultados:

- BrT1 = 87,3 %
- BrT2 = 86,9 %
- PrT1 = 5,1 %
- PrT2 = 5,1 %

Analisando os quatro provetes referidos e englobando todas as medições, verifica-se que, para este ensaio, a rugosidade não influencia de forma considerável o valor de reflectância. Analisando a figura 5.14, até ao ângulo de 45° os provetes lisos apresentam maior reflectância. A partir deste ângulo, os provetes rugosos apresentam reflectâncias semelhantes ou superiores aos correspondentes provetes lisos.

Cor

Como fenómeno físico, a cor é função do comprimento de onda. A luz visível é composta de diversos comprimentos de ondas compreendidos entre 380 e 780 nm. A cada comprimento de onda, delimitado nesse intervalo, corresponde uma sensação particular de cor, obtida pela estimulação da retina [CASTRO, 2002].

No ensaio efectuado a cor apresenta-se como um factor determinante e diferenciador, permitindo constatar a sua influência no comprimento de onda ensaiado (região do visível). Optou-se por apenas apresentar nas figuras 5.15 e 5.16, os provetes pintados com tinta reflectante, visto somente se pretender aferir a influência da cor no comportamento reflectivo da superfície. Na figura 5.15 apresenta-se a variação da reflectância, tendo em conta a cor e o tipo de superfície (rugoso), enquanto na figura 5.16 a superfície é lisa.

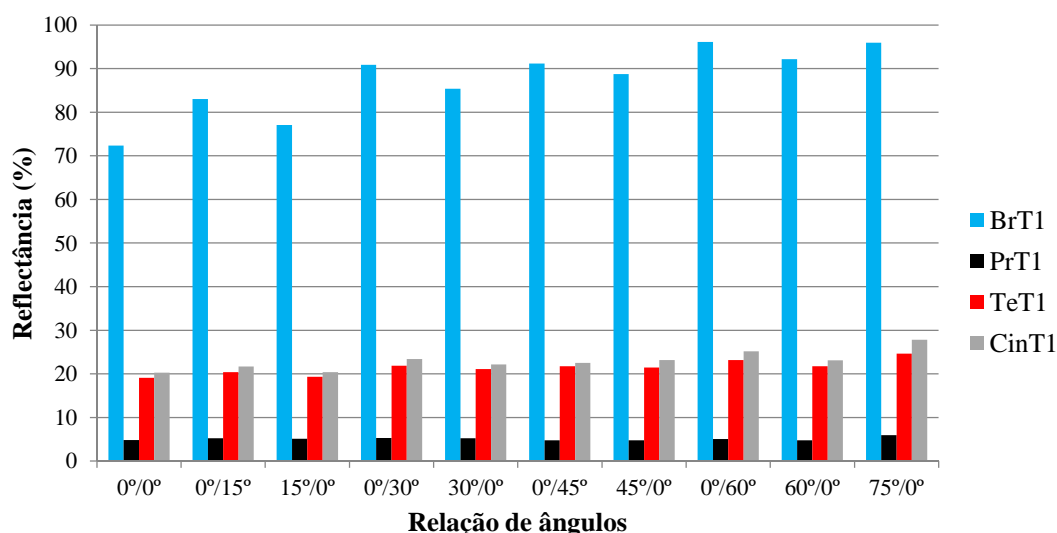


Fig. 5.15: Evolução da reflectância em função do ângulo e cor para provetes rugosos

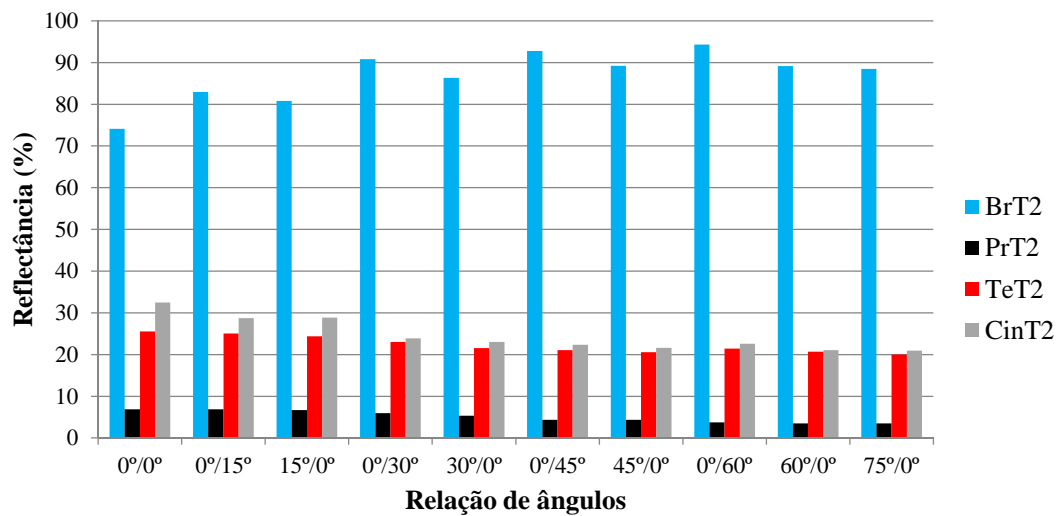


Fig. 5.16: Evolução da reflectância em função do ângulo e cor para provetes lisos

Analisando os dois gráficos, constata-se que a cor branca apresenta valores de reflectância superiores às restantes cores, em ambas as superfícies. Em relação às restantes cores, o preto apresenta os valores mais baixos, enquanto que nas cores telha e cinza estes aumentam mas nunca atingem valores próximos dos resultados obtidos para a cor branca. A cor cinza, criada no âmbito deste trabalho como cor intermédia e alternativa à cor telha, exhibe valores ligeiramente superiores à cor telha, provando ser uma opção válida, não só a nível de desempenho mas também a nível estético. Esta é uma vantagem importante na arquitectura e estética de um edifício, que não compromete o rendimento energético do edifício.

As tintas reflectantes são um exemplo de revestimentos altamente reflectivos. Como foi referido anteriormente, este tipo de revestimentos consistem em partículas de pigmento que dispersam eficazmente a luz incidente, suspensas numa matriz transparente. A luz que incide sobre este tipo de revestimentos é primeiramente dispersa múltiplas vezes antes de emergir a partir do revestimento como luz reflectida. Este “percurso aleatório” pode ser bastante longo, dependendo em parte, da quantidade de materiais absorventes que podem reduzir a reflectância de forma considerável [BERDAHL & BRETZ, 1997].

É possível observar que as cores mais escuras como o preto, apresentam valores mais reduzidos de reflectância porque pigmentos coloridos absorvem mais energia em certos comprimentos de onda, enquanto que cores claras como o branco, absorvem menos ao reflectir mais, diminuindo o “percurso aleatório” referido anteriormente. Este resultado não surpreende, tendo já sido verificado em outros ensaios realizados no âmbito deste trabalho, sendo produto das características físicas e químicas das tintas aplicadas.

Tipo de tinta

Tal como foi referido anteriormente, foram aplicadas tintas convencionais e reflectantes em provetes de superfície rugosa e lisa, simulando o universo de superfícies disponíveis.

Na figura 5.17 apresenta-se para três medições 0°/X° (0°/0°, 0°/45° e 0°/60°) a diferença do valor de reflectância entre tintas convencionais e reflectantes, para superfície rugosa (tipo 1).

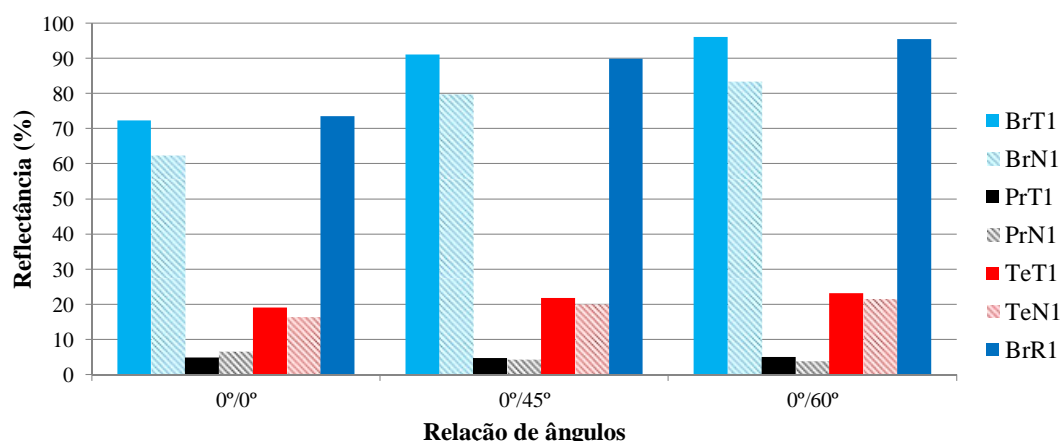


Fig. 5.17: Reflectância em função do tipo de tinta de provetes rugosos (tipo 1)

Observa-se que tintas reflectantes apresentam valores de reflectância superiores à correspondente convencional. Esta diferença é ainda mais notória na cor branca, estando directamente relacionada com a cor. A cor preta tem sempre um comportamento constante e semelhante, independentemente de ser uma tinta reflectante ou convencional, assim como a cor telha e cinza. À medida que a cor se torna mais clara, maior é a diferença entre uma tinta convencional e reflectante.

Os resultados são explicados por se tratar da região do visível, tendo a cor um papel determinante no desempenho. A diferença entre tintas convencionais e reflectantes advém da constituição da tinta e das características que potenciam, ou não, a reflectância. Factores como o tipo de pigmento usado ou a dimensão da partícula de pigmento permitem aos fabricantes de tintas optimizarem o desempenho e obterem a maior reflectância possível (dentro de uma determinada faixa espectral). O mesmo é sugerido por BERDAHL & BRETZ (1997), constatando que o tamanho da partícula do pigmento pode ser optimizada para uma elevada reflectância, consoante a faixa espectral pretendida, melhorando o desempenho da tinta no visível ou no infravermelho próximo.

5.2.3 Termografia de infravermelhos

Em condições controladas de laboratório realizaram-se ensaios que permitiram determinar a emitância e o desempenho térmico das tintas reflectantes e convencionais em estudo. Para avaliar o desempenho térmico, utilizaram-se diferentes formas de aquecimento, por condução e por radiação (infravermelha e solar).

Emitância

Um dos principais problemas que surgem na aplicação do método termográfico na análise da qualidade térmica de edifícios é a determinação da emitância dos materiais constituintes. A emitância é a característica que traduz a relação entre a radiação emitida por uma superfície e a sua temperatura. No fundo, é a propriedade da superfície que dita a eficiência da superfície analisada de emitir energia.

Recorreu-se a dois métodos para determinar, em laboratório, a emitância dos provetes em estudo, realizando-se os seguintes ensaios:

- Determinação da emitância usando um emissómetro portátil

- Determinação da emitância usando o método da fita - aquecimento por condução e análise termográfica

Emissómetro portátil

O emissómetro *Model AE1* determina a emitância total hemisférica de uma superfície a uma temperatura de 65°C. Os resultados obtidos proporcionam um meio de comparação entre as diferentes tintas ensaiadas, quantificando a emitância.

No quadro 5.12 apresentam-se os valores de emitância obtidos para os provetes ensaiados na Universidade Politécnica de Madrid.

Quadro 5.12: Valores de emitância (ε) para os provetes ensaiados

Proвете	ε
BrT2	0,89
PrN2	0,9
PrT2	0,89
TeN2	0,9
TeT2	0,89
CinT2	0,87
Fita negra	0,88

Os valores obtidos revelam que tintas reflectantes, independentemente da cor, apresentam um valor de emitância igual ($\varepsilon = 0,89$), sendo a única excepção a cor cinza (proвете CinT2). A mesma situação ocorre para as tintas não reflectantes (convencionais), apresentando um valor constante de 0,90.

Verifica-se que a diferença entre tintas reflectantes e convencionais é mínima. Os valores obtidos neste ensaio serão usados na configuração da câmara termográfica, aquando da realização dos restantes ensaios que envolvam a utilização do referido equipamento, seja em laboratório ou *in situ*. Estes resultados permitiram avaliar a fiabilidade dos resultados obtidos com o método da fita.

Aquecimento por condução - método da fita

É possível entender que a aplicação da Termografia a edifícios seja um campo difícil de abordar porque está dependente do tipo de materiais que os constituem, podendo estes materiais apresentar emitâncias diferentes e de valores baixos ($\varepsilon < 0,5$).

Tal como foi referido anteriormente (secção 4.2.2), todos os provetes foram colocados a aquecer com uma fita negra colada, cuja emitância é conhecida ($\varepsilon = 0,88$). Este valor foi determinado com o recurso a um emissómetro portátil (quadro 5.12), sendo o procedimento de ensaio baseado na norma ASTM C 1371-04a [ASTM, 2004]. A fita negra de emitância conhecida serve de referência para a determinação da emitância da tinta, conforme descrito na secção 4.2.2 e baseado na norma ASTM E 1933-99 [ASTM, 1999].

Os parâmetros considerados na análise termográfica foram: $\varepsilon = 0,88$; $D_{obj} = 2$ m; $T_{atm} = 19,3$ °C, HR = 48 %, $T_{refl} = 19,3$ °C, correspondentes às condições no laboratório na altura do ensaio.

Na figura 5.18 observa-se o padrão de temperatura superficial do provete BrT, imediatamente após o período de aquecimento de 40 minutos.

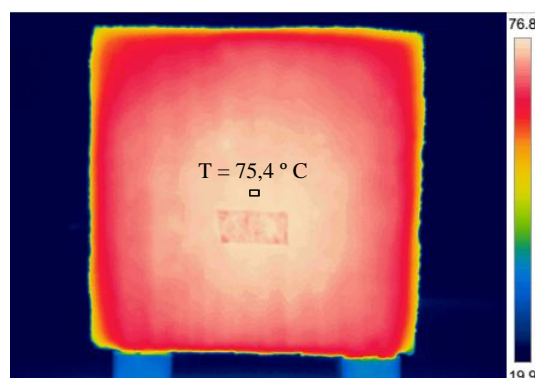


Fig. 5.18: Termografia do provete BrT aos 0 minutos de arrefecimento

É possível verificar que o provete apresenta um aquecimento uniforme apenas com ligeiras variações da temperatura junto à orla exterior do provete. Esta situação decorre das extremidades estarem mais expostas ao ambiente exterior (mais frio) do que o centro do provete. Esta é a razão pela qual a fita foi colocada na zona central do provete com temperatura mais uniforme.

O que seria expectável era que todos os provetes, reflectantes e convencionais, apresentassem uma temperatura igual logo após o aquecimento, visto todos serem constituídos pelo mesmo material e o aquecimento ser por condução. No entanto, verificou-se que as temperaturas no início do período de arrefecimento não foram iguais em todos os provetes. Este facto pode ser explicado por não ser possível garantir o contacto total entre a placa de aquecimento e o provete, devido à rugosidade, criando “pequenas bolsas de ar quente” que, depois de aquecido, rapidamente arrefece. Os provetes que ficaram mais aderentes apresentam valores mais altos e os que não ficaram totalmente aderidos, apresentam valores menores.

No quadro 5.13 evidencia-se este facto e apresenta-se a variação da temperatura durante o arrefecimento.

Quadro 5.13: Valores de temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após condução

	Tempo (min)	0	5	10	15
BrN	$T_{provetete}$ (°C)	74,6	53,5	38,3	30
	T_{fita} (°C)	73,1	53,9	38,6	28
BrT	$T_{provetete}$ (°C)	75,4	45,4	34,7	28
	T_{fita} (°C)	74,1	46,2	35,1	28,2
PrN	$T_{provetete}$ (°C)	76,9	48,9	36,1	30,2
	T_{fita} (°C)	77,2	50,1	36,8	30,5
PrT	$T_{provetete}$ (°C)	79,6	49,8	34,2	29,6
	T_{fita} (°C)	79	50,5	34,5	29,8
TeN	$T_{provetete}$ (°C)	76,4	48,1	35,8	30,1
	T_{fita} (°C)	76,5	50	36,7	30,8
TeT	$T_{provetete}$ (°C)	79,8	50,4	38,3	31,4
	T_{fita} (°C)	78,6	51,4	39,1	31,9

Neste ensaio o que se pretende é, além de determinar a emitância das superfícies pintadas, avaliar como é que cada provete dissipa a sua energia, evidenciando a importância da emitância nesse arrefecimento.

Na figura 5.19 verifica-se a diminuição de temperatura à medida que o provete BrT dissipa o calor, em função da sua emitância.

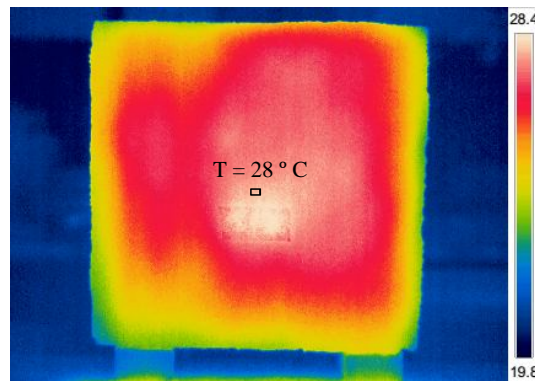


Fig. 5.19: Termografia do provete BrT aos 15 minutos de arrefecimento

Como é possível observar no gráfico abaixo (figura 5.20), todos os provetes apresentam o mesmo comportamento, convergindo para o mesmo valor: $\approx 30^\circ\text{C}$. Conclui-se que neste tipo de ensaio, quer a cor, quer as características físicas e químicas da tinta, não têm influência significativa no processo de arrefecimento. A capacidade da superfície emitir energia (emitância) terá influência na sua temperatura superficial, à medida que o provete arrefece, assim como as trocas de calor por condução e convecção que aí ocorrem. Ao longo do procedimento de ensaio, evitaram-se movimentações (de pessoas e material) de forma a minorar as perdas por convecção.

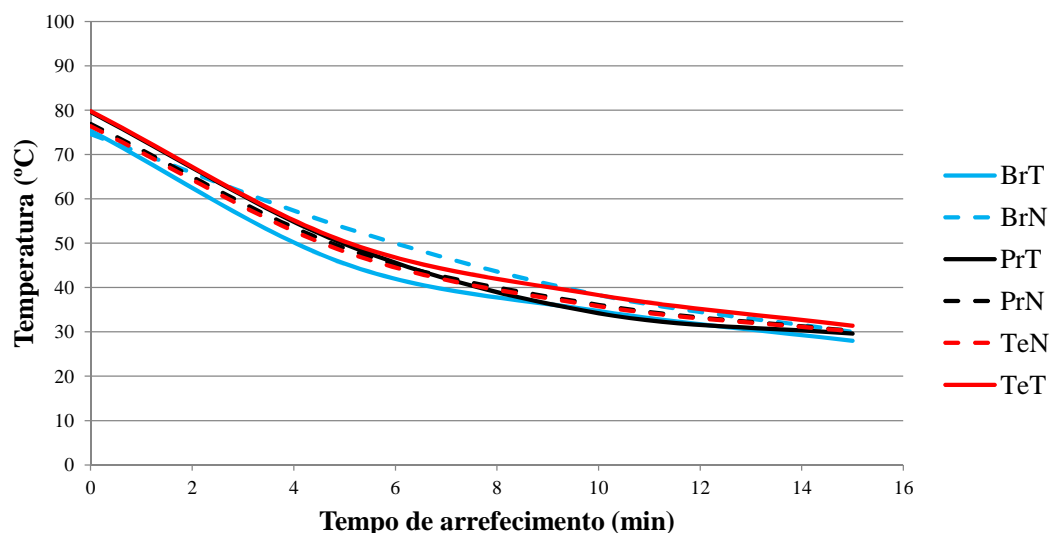


Fig. 5.20: Evolução da temperatura superficial após aquecimento por condução

A evolução das curvas permite prever, tal como foi confirmado pelo método da fita e pelo emissómetro, que as emitâncias serão muito semelhantes, visto que o comportamento das tintas durante o arrefecimento é muito semelhante.

Tal como referido anteriormente, recorreu-se ao método da fita como alternativa de determinação da emitância de cada provete. Sabe-se que a temperatura da fita é igual à temperatura da superfície do provete, pelo que é possível ajustar a emitância, igualando as duas temperaturas. Acertando as temperaturas da superfície do provete em função da temperatura da fita negra de emitância conhecida, obtém-se o valor de emitância correspondente à superfície do provete.

Aplicando o método da fita apresentam-se, no quadro 5.14, os valores de emitância corrigida e temperatura da fita negra, obtidos ao longo do período de arrefecimento.

Quadro 5.14: Valores de temperatura superficial da fita e emitância corrigida dos provetes

Tempo (min)		0	5	10	15
BrN	T_{fita} (°C)	74,6	53,5	38,3	30,0
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,91	0,875	0,865	0,88
BrT	T_{fita} (°C)	74,1	46,2	35,1	28,2
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,91	0,855	0,855	0,86
PrN	T_{fita} (°C)	77,2	50,1	36,8	30,5
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,88	0,84	0,845	0,855
PrT	T_{fita} (°C)	79,0	50,5	34,5	29,8
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,89	0,855	0,865	0,86
TeN	T_{fita} (°C)	76,5	50,0	36,7	30,8
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,88	0,82	0,83	0,83
TeT	T_{fita} (°C)	78,6	51,4	39,1	31,9
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,90	0,845	0,845	0,84

A emitância apresenta um papel importante na capacidade de um objecto dissipar energia, o que influencia o conforto térmico de uma habitação. A Termografia de infravermelhos é mais bem sucedida quando é aplicada em superfícies com elevada emitância [MADALGUE, 2001a]. Estas superfícies emitem radiação com mais intensidade a uma determinada temperatura, providenciando um sinal mais forte para o detector infravermelho captar.

Por isso, torna-se relevante determinar não só se a emitância é elevada ou não, garantindo um melhor ou pior desempenho térmico, mas também se permite assegurar termografias cujos valores de temperatura apresentados sejam fiáveis. Segundo MADALGUE (2001a), quando mais elevada a emitância de uma superfície, menor é a componente reflectida de radiação proveniente de outras fontes e, consequentemente, menor o erro associado.

Analisando o quadro 5.15 observa-se que a diferença entre a emitância que se obtém imediatamente depois de cessado o aquecimento ($\varepsilon_{inicial}$) e ao fim de 15 minutos de arrefecimento (ε_{final}) é mínima.

Quadro 5.15: Variação da emitância ao longo do período de arrefecimento

Provete	T _i (°C)	T _f (°C)	$\varepsilon_{\text{inicial}}$	$\varepsilon_{\text{final}}$	$\Delta\varepsilon$ (%)
BrN	74,6	30	0,91	0,88	3
BrT	75,4	28	0,91	0,86	5
PrN	76,9	30,2	0,88	0,855	3
PrT	79,6	29,6	0,89	0,86	3
TeN	76,4	30,1	0,88	0,83	6
TeT	79,8	30,1	0,9	0,84	7

Observa-se, no quadro 5.15, que a variação da emitância ao longo do período de arrefecimento é reduzida, tendo como máximo o provete TeT com $\Delta\varepsilon = 7$ %.

Sabe-se que a emitância é função da temperatura superficial do provete, do comprimento de onda e do ângulo de observação. Neste caso o comprimento de onda não é relevante visto que a gama de temperatura observada corresponde praticamente ao mesmo comprimento de onda. O ângulo de observação também não tem influência, visto as termografias serem realizadas na perpendicular ao provete.

Segundo BARREIRA (2004), se o objecto tiver um comportamento próximo do corpo cinzento (emitância independente do comprimento de onda) e as medições forem efectuadas na perpendicular, a emitância pode ser considerada constante. Por isso, como as medições são mais fiáveis com temperaturas elevadas, consideram-se os valores da emitância para o primeiro valor obtido.

Comparando o primeiro valor de emitância corrigida, correspondente ao momento em que termina o aquecimento (medição com temperatura mais elevada), com os valores obtidos com o emissómetro portátil, verifica-se que os valores são muito semelhantes (quadro 5.16).

Quadro 5.16: Comparação da emitância obtida pelo método das fitas e emissómetro portátil

Provete	$\varepsilon_{\text{inicial}}$	$\varepsilon_{\text{Madrid}}$	$\Delta\varepsilon$ (%)
BrN	0,91	0,9	1
BrT	0,91	0,89	2
PrN	0,88	0,9	-2
PrT	0,89	0,89	0
TeN	0,88	0,9	-2
TeT	0,9	0,89	1

Observando a figura 5.21 verifica-se que, para não metais, a emitância no intervalo 273,15 a 400 K (0 a 126,85 °C), varia muito pouco ($\pm 0,01$) estando directamente relacionada com o tipo de superfície e material.

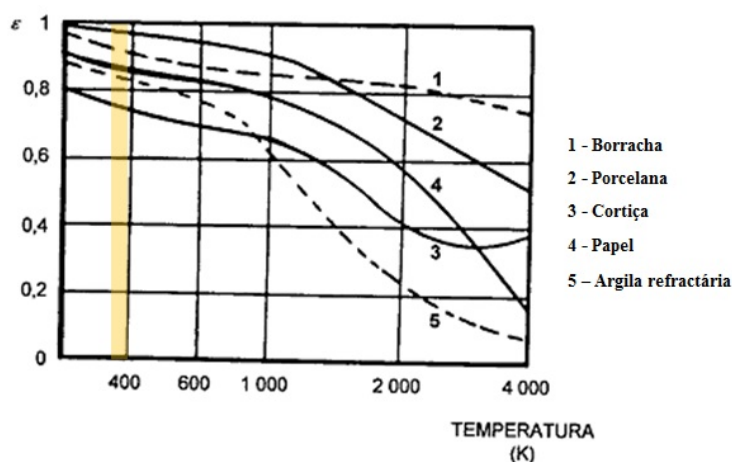


Fig. 5.21: Variação da emitância com a temperatura de alguns não-metais adaptado de [BARREIRA, 2004]

A faixa colorida representa a gama de temperaturas na qual o ensaio realizado se insere. Verifica-se que a diferença de temperatura existente, no início e fim do arrefecimento, é mínima ($\Delta T \approx 44^\circ\text{C}$) quando comparada com o limite acima referido de $\approx 130^\circ\text{C}$.

Se compararmos a inclinação da linha de tendência da porcelana (mais lisa) com a da cortiça (mais rugosa), verifica-se que a cortiça tem uma inclinação maior, variando mais para o mesmo intervalo de temperatura. Neste caso como todos os provetes são do mesmo tipo de superfície e material, a influência que estes podem ter na emitância, é negligenciável como meio de comparação entre provetes reflectantes e convencionais. A variação da temperatura é praticamente igual em todos os provetes, provando que estes se comportam da mesma forma quando estão a emitir, mesmo tendo valores de emitância diferentes.

Percebe-se assim que o desempenho térmico da tinta reflectante não difere do da tinta convencional, quando apenas se avalia a componente que depende da capacidade emissora da superfície. Tanto pelo método da fita, como pelo emissómetro portátil, os valores obtidos revelam que as emitâncias das tintas reflectantes e convencionais são muito semelhantes.

Sendo o ensaio do emissómetro normalizado (ASTM C 1371-04a) [ASTM, 2004], os resultados por este obtidos permitem validar o ensaio realizado com o método da fita e a termografia em laboratório. Este último método tem a vantagem de não ter limitações quanto ao tipo de material a ensaiar e tamanho da amostra, contrariamente ao emissómetro (Model AE1).

Desempenho térmico - Aquecimento por condução do provete duo-cor

Para avaliar o comportamento térmico das diferentes tintas por análise termográfica em laboratório, criou-se um novo provete denominado duo-cor. Este foi submetido ao mesmo método de aquecimento por condução, seguindo a mesma metodologia de ensaio.

O objectivo deste ensaio é avaliar o desempenho térmico das tintas em estudo e não quantificar a emitância. Como se pretende avaliar o desempenho térmico das tintas quando o provete arrefece, prolongou-se o período de arrefecimento para 30 minutos. As termografias foram captadas a cada 2 minutos, pretendendo-se desta forma captar as rápidas variações de temperatura que ocorrem. Nos últimos 10 minutos de arrefecimento as termografias foram obtidas de 5 em 5 minutos.

Os parâmetros considerados na análise termográfica foram: $\varepsilon = 0,88$; $D_{obj} = 2$ m; $T_{atm} = 16,6$ °C, $HR = 46$ %, $T_{refl} = 16,6$ °C ; são correspondentes às condições no laboratório na altura do ensaio. A câmara termográfica foi inicialmente configurada com uma emitância de 0,88 visto na câmara não ser possível atribuir emitâncias diferentes, a diferentes zonas da imagem. Esta correcção é apenas possível por software, introduzindo para tintas reflectantes $\varepsilon = 0,89$, e para tintas convencionais $\varepsilon = 0,90$, conforme os valores obtidos.

Na figura 5.22 observa-se o padrão de temperatura superficial do provete duo-cor, imediatamente após aquecimento. Verifica-se o que já tinha sido observado nos provetes individuais correspondentes a diferentes cores e tipos de tinta. O termograma obtido imediatamente depois de cessado o aquecimento surge com a superfície do provete toda à mesma temperatura.

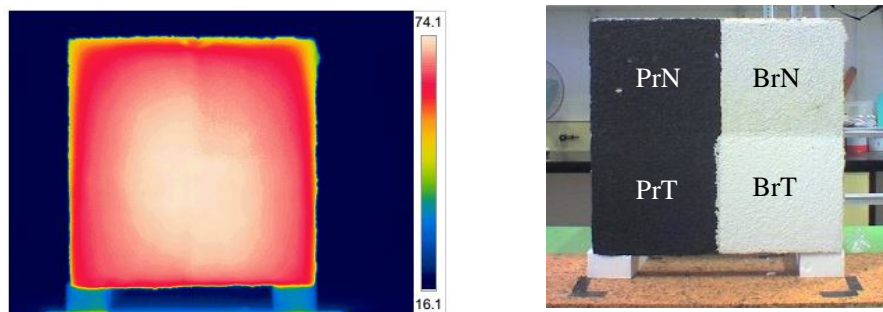


Fig. 5.22: Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real

Observa-se que ambos os tipos de tinta, independentemente da cor, têm o mesmo comportamento quando sujeitos ao aquecimento por condução, apresentando um valor idêntico de temperatura imediatamente após o aquecimento.

No quadro 5.17 apresenta-se a variação da temperatura superficial em cada tipo de tinta, ao longo do período de arrefecimento, assim como a diferença de temperatura entre cores reflectantes e convencionais (ΔT_{branco} e ΔT_{preto}).

Quadro 5.17: Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após condução - Provette duo-cor

Tempo (min)	T _{BrN} (°C)	T _{BrT} (°C)	T _{PrN} (°C)	T _{PrT} (°C)	ΔT_{branco} (°C)	ΔT_{preto} (°C)
0	70,8	73	72,1	73,2	2	1
2	57,7	60,4	61,2	61,1	3	0
4	44,4	47,4	47	47,1	3	0
6	40,7	43,1	42,6	42,7	2	0
8	34,7	36,4	36,5	35,7	2	-1
10	32,9	34,7	34,7	34,3	2	0
12	29,1	30,3	30,4	29,3	1	-1
14	26,5	27,7	27,7	26,8	1	-1
16	25,1	26,1	26,1	25,3	1	-1
18	23,6	24,4	24,7	24	1	-1
20	22,4	22,9	23,1	22,2	1	-1
25	21,4	21,8	21,8	21,1	0	-1
30	20,1	20,3	20,5	20	0	-1

Para a mesma cor, existem ligeiras diferenças de temperatura mas estas relacionam-se com o método usado para aquecer os provetes, visto ser difícil garantir um contacto uniforme da placa de aquecimento com a superfície do provete. Apesar do erro associado ao ensaio existir, este é mínimo, pois a média da diferença de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais ao longo do arrefecimento é de $\Delta T_{branco}^{medio} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{preto}^{medio} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Existem zonas que estão mais quentes e outras mais frias, não devido à característica reflectante ou não da tinta mas sim devido a uma zona com maior, ou menor, contacto com a placa de aquecimento. As zonas que estão mais quentes vão demorar mais tempo a arrefecer, evidenciando os padrões de temperatura que se observa nos termogramas, visíveis na figura 5.23.

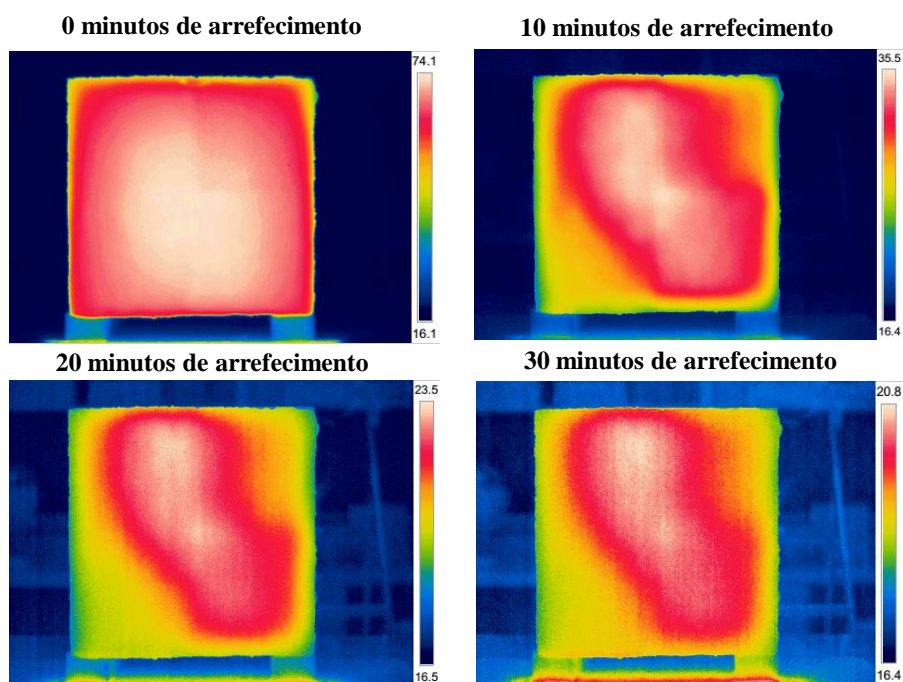


Fig. 5.23: Evolução do padrão de temperatura durante o período de arrefecimento

No gráfico da figura 5.24 é possível observar a evolução da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento.

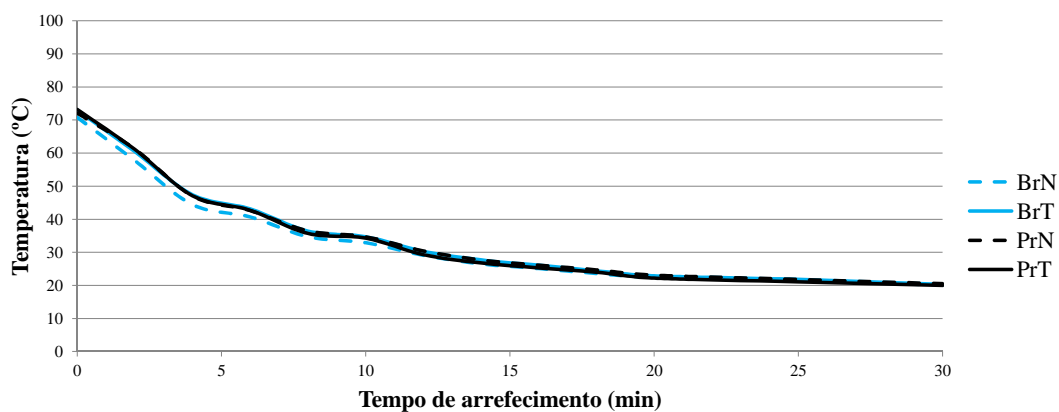


Fig. 5.24: Evolução da temperatura superficial durante o período de arrefecimento após condução - Provette duo-cor

O comportamento é idêntico em todas as tintas porque estas apresentam valores de emitância muito semelhantes e estão aplicadas em suportes do mesmo material.

Desempenho térmico - Aquecimento por radiação infravermelha

A fachada de um edifício encontra-se diariamente sujeita a radiação solar. O espectro solar que constitui a radiação incidente na fachada abrange três regiões: ultravioleta, visível e infravermelha. Pretende-se simular em laboratório parte da radiação incidente (radiação infravermelha), observando a variação de temperatura superficial que cada provete apresenta, quando solicitado pela placa de aquecimento (figura 4.20).

Tal como no aquecimento por condução foi colocada em todos os provetes uma fita negra de emitância conhecida ($\varepsilon = 0.88$). Determinou-se a emitância de cada provete pelo método da fita ao longo do período de arrefecimento. Os parâmetros considerados na análise termográfica foram: $\varepsilon = 0,88$; $D_{obj} = 2$ m; $T_{atm} = 17,5^{\circ}\text{C}$, $HR = 59\%$, $T_{refl} = 17,5^{\circ}\text{C}$.

Nas figuras 5.25 e 5.26 observam-se os padrões de temperatura superficial do provete BrT, imediatamente após aquecimento e no final do arrefecimento (15 minutos).

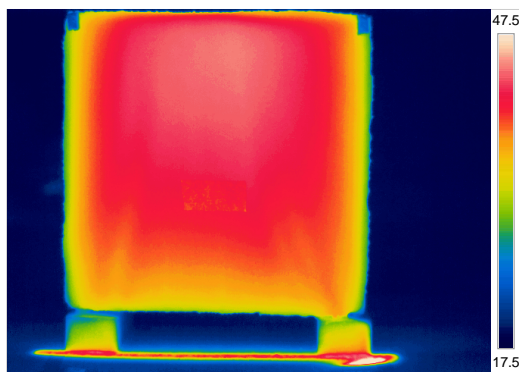


Fig. 5.25: Termografia aos 0 minutos de arrefecimento - provete BrT

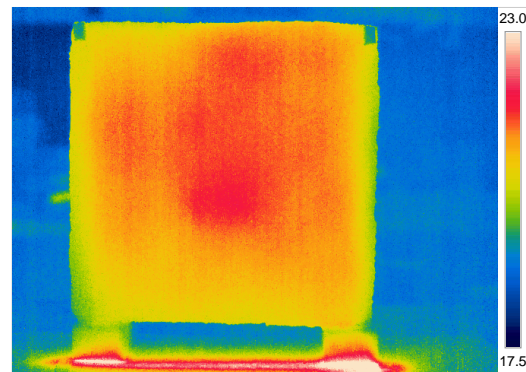


Fig. 5.26: Termografia aos 15 minutos de arrefecimento - provete BrT

Apresenta-se nas figuras seguintes o padrão de temperatura superficial obtido para o provete BrN no início e final do arrefecimento, mantendo os mesmos intervalos de temperatura ($\delta T = 30^{\circ}\text{C}$ e $\delta T = 5,5^{\circ}\text{C}$)

No exterior, a parede está sujeita a vários agentes, como o vento, chuva, nebulosidade entre outros, que originam flutuações da temperatura superficial da parede. Este fenómeno é mais evidente nas termografias efectuadas em condições reais de exposição (secção 5.3).

As termografias obtidas permitem vislumbrar o efeito da convecção na temperatura superficial dos provetes. O facto do provete estar colocado sobre uma base de poliestireno expandido, permite a ventilação do ar existente entre a placa de aquecimento e o provete. À medida que esse ar vai aquecendo, formam-se correntes de ar quente ascendentes, formando os padrões observados nas figuras 5.25 e 5.27. Devido a este fenómeno formam-se zonas mais quentes no topo e mais frias na base.

Analisando os termogramas apresentados (figura 5.25 a 5.28) percebe-se que, finalizado o aquecimento, ambos os provetes BrT e BrN demonstram o mesmo padrão de temperatura superficial, sendo os valores

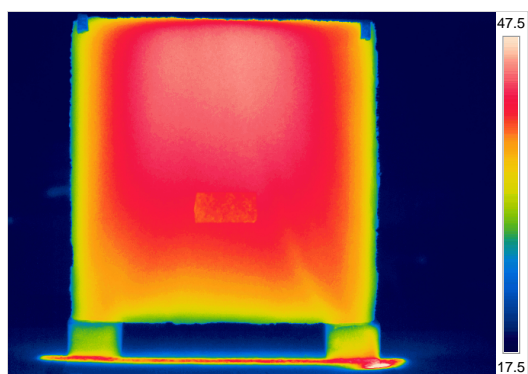


Fig. 5.27: Termografia aos 0 minutos de arrefecimento - provete BrN

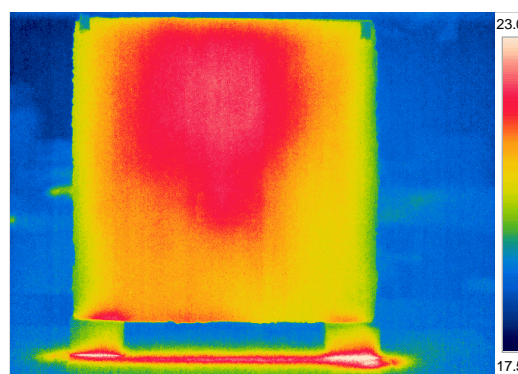


Fig. 5.28: Termografia aos 15 minutos de arrefecimento - provete BrN

de temperatura idênticos. A mesma situação foi verificada para os restantes provetes (PrT, PrN, TeT e TeN), como é visível no quadro 5.18.

Quadro 5.18: Temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após radiação infravermelha

		Tempo (min)	0	5	10	15
BrN	T_{provet} (°C)		42,1	30,3	24,8	22,1
	T_{fita} (°C)		40,1	30,1	24,7	22
BrT	T_{provet} (°C)		42,1	28,6	23,9	21,7
	T_{fita} (°C)		40,7	28,6	24,1	21,9
PrN	T_{provet} (°C)		42,6	31,1	26,4	23,7
	T_{fita} (°C)		41,8	31,3	26,6	23,8
PrT	T_{provet} (°C)		43,1	32,4	26,3	23,3
	T_{fita} (°C)		42,2	32,3	26,3	23,2
TeN	T_{provet} (°C)		43	30,7	26,1	23,3
	T_{fita} (°C)		42	31	26,5	23,6
TeT	T_{provet} (°C)		43,7	31,6	26,1	23,2
	T_{fita} (°C)		42,2	31,6	26,1	23,3

Na última termografia do período de arrefecimento (figura 5.28) é perceptível que no provete BrN ainda existe uma zona com temperatura mais elevada, não tendo arrefecido na totalidade. No provete BrT acontece o mesmo fenómeno, embora com menor intensidade (figura 5.26).

Verificou-se que tintas reflectantes e de cor mais escura apresentam valores mais altos de temperatura, embora a diferença seja mínima. Por exemplo, para a cor preta, a diferença de temperatura entre a tinta reflectante e convencional, aos 0 minutos de arrefecimento é de 0,5 °C, para a cor telha é de 0,7 °C e para a cor branca é de 0 °C.

Seria expectável que os provetes pintados com tintas reflectantes apresentassem temperaturas mais baixas que a correspondente tinta convencional. A elevada reflectância solar destas tintas permitiria aumentar a componente de radiação reflectida pela superfície, diminuindo a absorvida, reduzindo assim a temperatura superficial.

A explicação para os resultados obtidos reside na faixa de comprimento de onda da radiação que irradia o provete. A radiação térmica que irradia o provete, proveniente da placa de aquecimento, encontra-se na gama do infravermelho médio (8-10 μm).

O quadro 5.19 apresenta os comprimentos de onda máximos para os quais se tem o maior valor de poder emissivo a uma determinada temperatura, aplicando a Lei de Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = 2898 \cdot T^{-1} \quad (5.4)$$

Quadro 5.19: Comprimentos de onda na gama de temperatura do ensaio pela Lei de Wien

T (°C)	T (K)	$\lambda_{\text{máx}}$ (μm)
0	273,15	10,61
17	290,15	9,99
22	295,15	9,82
32	305,15	9,50
42	315,15	9,20
74	347,15	8,35

Como é possível observar, a radiação incidente no provete está dentro do intervalo aproximado de 8,35 a 9,20 μm , que fica distante da região do espectro electromagnético onde as tintas reflectantes funcionam melhor (0,4 a 2,3 μm).

Os resultados obtidos nos ensaios de determinação da reflectância (secção 5.2.1 - Espectrofotometria) permitem concluir que as tintas reflectantes ensaiadas apresentam valores elevados de reflectância apenas quando são irradiadas por radiação solar (até 2,5 μm). A característica que poderia baixar a temperatura (reflectância elevada) não tem influência quando a parede é irradiada por radiação com comprimentos de onda superiores a 2,5 μm , visto que apenas na faixa espectral correspondente à radiação solar é que as tintas reflectantes apresentam elevada reflectância.

Comparando os dois gráficos com a variação da temperatura superficial no período de arrefecimento após o aquecimento por condução (figura 5.29) e radiação (figura 5.30), observa-se que ambos exibem um desempenho idêntico, independentemente do tipo e cor da tinta.

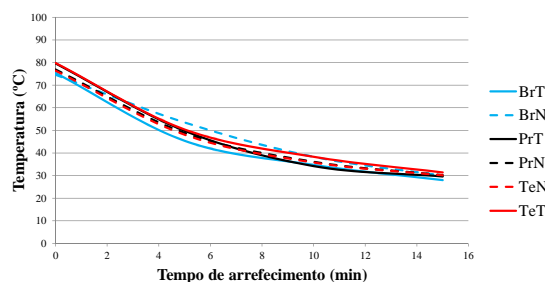


Fig. 5.29: Variação da temperatura superficial - aquecimento por condução

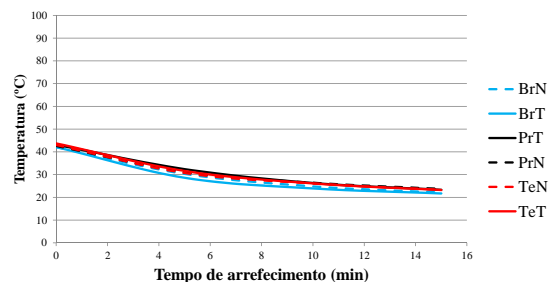


Fig. 5.30: Variação da temperatura superficial - aquecimento por radiação infravermelha

Observa-se que o gráfico da figura 5.30 aparenta ser a continuação do gráfico da figura 5.29, não existindo diferença no comportamento térmico dos provetes, independentemente do método usado para aquecê-los.

No mesmo gráfico (figura 5.30) é possível observar que qualquer cor ou tipo de tinta (reflectante ou convencional) tem um arrefecimento praticamente idêntico, sugerindo um desempenho emissivo muito semelhante. Tal facto traduz-se em valores de emitância praticamente idênticos.

O quadro 5.20 apresenta os valores de emitância corrigidos obtidos pelo método da fita e a respectiva temperatura na fita no período de arrefecimento.

Quadro 5.20: Variação da emitância no período de arrefecimento

Tempo (min)		0	5	10	15
BrN	T_{fita} (°C)	40,1	30,1	24,7	22,0
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,97	0,895	0,89	0,89
BrT	T_{fita} (°C)	40,7	28,6	24,1	21,9
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,94	0,88	0,86	0,84
PrN	T_{fita} (°C)	41,8	31,3	26,6	23,8
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,915	0,87	0,86	0,86
PrT	T_{fita} (°C)	42,2	32,3	26,3	23,2
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,92	0,89	0,88	0,89
TeN	T_{fita} (°C)	42,0	31,0	26,5	23,6
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,92	0,855	0,84	0,84
TeT	T_{fita} (°C)	42,2	31,6	26,1	23,3
	$\varepsilon_{corrigida}$	0,94	0,88	0,880	0,87

Tal como no ensaio anterior (após o aquecimento por condução), verificou-se que a emitância foi semelhante entre todos os provetes ensaiados. Esta ideia é reforçada quando se observa o arrefecimento de cada provete e se verifica que as curvas de temperatura são praticamente coincidentes.

Desempenho térmico - Aquecimento por radiação infravermelha do provete duo-cor

Para uma melhor percepção visual do que foi evidenciado anteriormente, recorreu-se ao provete duo-cor para demonstrar o comportamento das tintas reflectantes quando sujeitas a radiação infravermelha acima dos $2,5 \mu\text{m}$ de comprimento de onda. Este foi submetido ao mesmo método de aquecimento por radiação infravermelha, seguindo a mesma metodologia de ensaio.

Os parâmetros considerados na análise termográfica foram: $\varepsilon = 0,88$; $D_{obj} = 2 \text{ m}$; $T_{atm} = 16,6^\circ\text{C}$, HR = 46%, $T_{refl} = 16,6^\circ\text{C}$, seguindo a metodologia do ensaio anterior.

Na figura 5.31 observa-se o padrão de temperatura superficial do provete duo-cor, imediatamente após aquecimento.

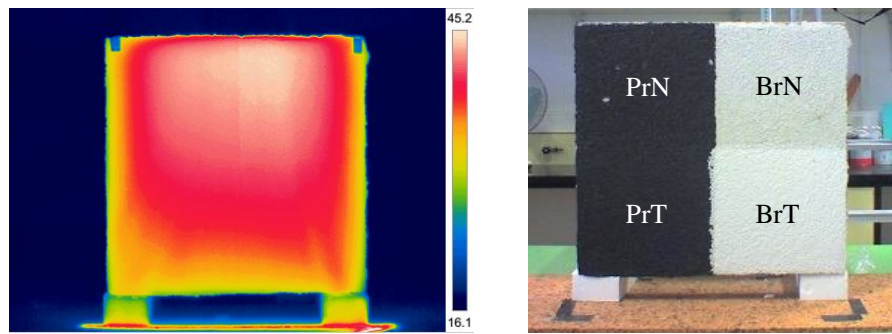


Fig. 5.31: Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real

Verifica-se o que já tinha sido observado nos provetes individuais quando ensaiados por radiação infravermelha. O termograma obtido imediatamente depois de cessado o aquecimento surge com a superfície do provete toda à mesma temperatura. O mesmo resultado foi observado quando o provete duo-cor é aquecido por condução.

No quadro 5.21 apresenta-se a variação da temperatura superficial em cada tipo de tinta, ao longo do período de arrefecimento (com emitância corrigida).

Quadro 5.21: Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após radiação infravermelha - Provette duo-cor

Tempo (min)	T _{BrN} (°C)	T _{BrT} (°C)	T _{PrN} (°C)	T _{PrT} (°C)	ΔT_{branco} (°C)	ΔT_{preto} (°C)
0	42,8	40,6	42,3	40,5	2,2	1,8
2	34,8	33,3	35,2	33,3	1,5	1,9
4	28,4	28,0	29,1	27,7	0,4	1,4
6	27,5	27,3	28,3	26,9	0,2	1,4
8	26,0	26,0	26,8	25,7	0,0	1,1
10	24,5	24,6	25,3	24,6	-0,1	0,7
12	23,0	23,0	23,6	22,6	0,0	1,0
14	22,2	22,1	22,7	21,9	0,1	0,8
16	21,3	21,4	20,9	21,0	-0,1	-0,1
18	20,5	20,5	20,8	20,2	0,0	0,6
20	20,1	20,1	20,5	19,9	0,0	0,6
25	19,3	19,3	19,5	19,1	0,0	0,4
30	18,6	18,6	18,7	18,4	0,0	0,3

Em suma, o que se observa com o provete duo-cor corresponde ao observado nos provetes individuais da mesma cor e tipo de tinta. Embora se esteja a irradiar o provete, a radiação que incide sobre este é infravermelha com comprimentos de onda superiores aos da radiação solar. Esta situação significa que uma tinta reflectante, quando solicitada por radiação infravermelha acima dos $2,3 \mu\text{m}$, não apresenta diferenças de temperatura significativas, quando comparada com uma tinta convencional: $\Delta T_{\text{branco}}^{\text{médio}} = 0,4^\circ\text{C}$ e $\Delta T_{\text{preto}}^{\text{médio}} = 0,9^\circ\text{C}$.

Na figura 5.32 observa-se a evolução da temperatura superficial do provete duo-cor depois de aquecido por radiação infravermelha.

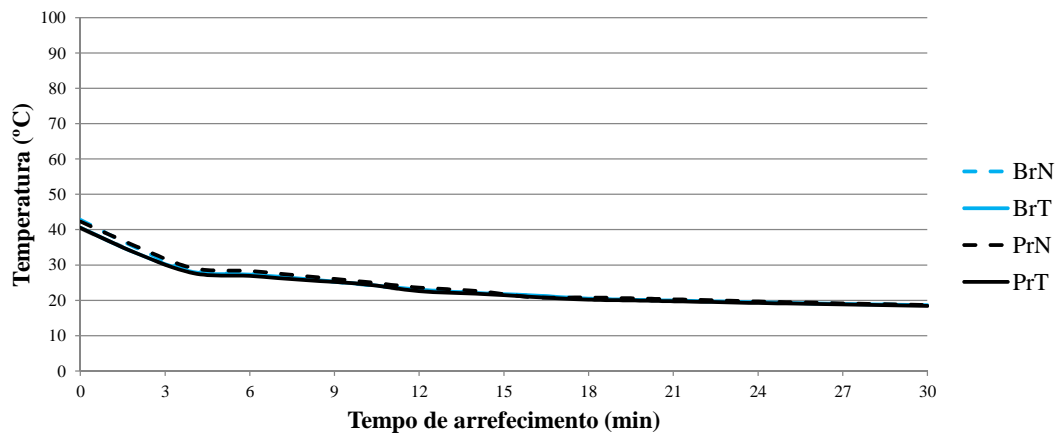


Fig. 5.32: Evolução da temperatura superficial durante o período de arrefecimento após radiação infravermelha - Provete duo-cor

Tal como foi verificado em ensaios anteriores, nos quais os provetes individuais foram aquecidos por condução (figura 5.29) e radiação infravermelha (figura 5.30), o arrefecimento é idêntico em todas as tintas. A explicação reside no facto de, tanto tintas reflectantes como convencionais, apresentarem valores de emitância muito semelhantes e estarem aplicadas em suportes do mesmo material.

Desempenho térmico - Aquecimento por radiação solar do provete duo-cor

Após a análise termográfica dos provetes quando solicitados por radiação infravermelha, procedeu-se à irradiação solar do provete duo-cor. O principal objectivo deste ensaio é verificar se o desempenho térmico das tintas é alterado quando são irradiadas pelo Sol, comparando com os resultados obtidos no ensaio anterior (aquecimento por radiação infravermelha - provete duo-cor) e se esta alteração no desempenho é confirmada com a Termografia.

Os parâmetros considerados na análise termográfica foram: $\varepsilon = 0,88$; $D_{obj} = 2$ m; $T_{atm} = 16,6$ °C, HR = 46 %, $T_{refl} = 16,6$ °C ; correspondem às condições no laboratório na altura do ensaio.

Seguindo a metodologia dos ensaios anteriores, a câmara termográfica foi inicialmente configurada com uma emitância de 0,88. A correcção foi efectuada posteriormente no software, introduzindo para tintas reflectantes $\varepsilon = 0,89$ e $\varepsilon = 0,90$ para tintas convencionais.

Na figura 5.33 observa-se o padrão de temperatura superficial do provete duo-cor, imediatamente após estar exposto ao sol.

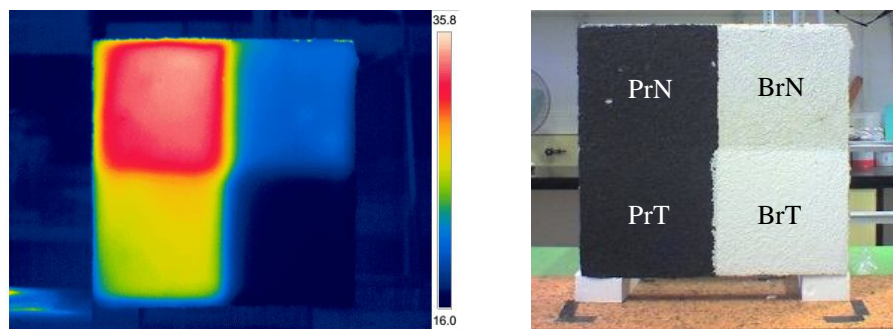


Fig. 5.33: Termografia aos 0 minutos de arrefecimento e correspondente imagem real

É facilmente perceptível que, quando insoladas, as tintas reflectantes e convencionais reagem de forma distinta. Como a radiação que incide no provete é proveniente do sol, é previsível que zonas pintadas com cores diferentes apresentem temperaturas diferentes. Este resultado já tinha sido constatado nos ensaios de espectrofotometria e esfera integradora (secção 5.2.1), assim como no de reflectância direcciona (secção 5.2.2), verificando-se reflectâncias diferentes para cores diferentes.

No quadro 5.22 apresenta-se a variação da temperatura superficial para cada tipo e cor de tinta, ao longo do período de arrefecimento.

Imediatamente após estar insolado, obtém-se um $\Delta T_{branco} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\Delta T_{preto} = 7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estes valores permitem verificar o efeito que tintas reflectantes podem ter no desempenho térmico de uma parede. Como já foi referido, a melhoria do desempenho térmico traduz-se essencialmente na redução dos ganhos térmicos devido a uma menor absorção de calor, que origina temperaturas superficiais mais baixas.

Quadro 5.22: Variação da temperatura superficial ao longo do período de arrefecimento após insolação - Provete duo-cor

Tempo (min)	T _{BrN} (°C)	T _{BrT} (°C)	T _{PrN} (°C)	T _{PrT} (°C)	ΔT_{branco} (°C)	ΔT_{preto} (°C)
0	20,2	16,2	33,3	26,1	4,0	7,2
2	19,8	16,6	29,8	24	3,2	5,8
4	19,5	16,5	28,3	22,5	3,0	5,8
6	19,2	16,7	26,5	21,6	2,5	4,9
8	19,1	17,0	25,0	21,0	2,1	4,0
10	18,7	17,0	23,1	19,8	1,7	3,3
12	18,8	17,2	22,7	19,7	1,6	3,0
14	18,6	17,1	21,8	19,1	1,5	2,7
16	18,4	17,0	21,0	18,5	1,4	2,5
18	18,4	17,1	20,6	18,4	1,3	2,2
20	18,4	17,2	20,1	18,2	1,2	1,9
25	18,4	17,2	19,4	18,0	1,2	1,4
30	18,3	17,3	19,1	17,9	1,0	1,2

Obteve-se uma diferença de temperatura considerável, que aumenta em cores escuras como o preto. É importante referir que os valores foram obtidos no período de Inverno, que tipicamente apresenta valores de radiação solar incidente menores, embora o sol esteja mais baixo. Verifica-se que para o pior caso possível (Inverno), tintas reflectantes apresentam melhor desempenho que tintas convencionais, obtendo-se diferenças de temperatura consideráveis, mesmo na cor branca.

O diferencial de temperatura vai diminuindo em função do tempo. A sua variação depende da forma como o material emite, assim como do suporte (isolante térmico). Mas tal, como foi observado anteriormente (secção 4.2.2 - Emitância), os valores de emitância são muito semelhantes entre cores, verificando-se um decaimento da temperatura praticamente constante ao longo do período de arrefecimento, convergindo para valores iguais. Isto é, a partir do momento em que o provete deixa de ser irradiado, a característica que influencia o seu arrefecimento é a emitância. A primeira termografia permite avaliar correctamente o desempenho térmico tendo em conta as características reflectoras da tinta. A partir desta medição e durante o arrefecimento, é a emitância que assegura o melhor ou pior desempenho, que neste caso é idêntico entre tintas reflectantes e convencionais, visto apresentarem valores muito semelhantes.

A escolha de uma cor em específico obedece a vários requisitos, sejam estes estéticos ou funcionais (durabilidade do isolante); para os últimos este ensaio pode oferecer algumas respostas. O quadro 5.23 apresenta a diferença de temperatura máxima entre cores, após exposição solar.

Quadro 5.23: Diferença de temperatura superficial entre a cor preta e branca aos 0 minutos de arrefecimento após insolação

Cor	$\Delta T (^{\circ}C)$
PrN - BrN	13,3
PrT - BrT	9,9

É notória a diferença considerável de temperatura que existe entre as cores preta e branca. Esta diferença é menor em tintas reflectantes, revelando um melhor desempenho, quando estas são insoladas.

Assim verifica-se que a escolha da cor de uma superfície não deve basear-se apenas em motivações estéticas. Os aspectos funcionais e de durabilidade dos materiais apresentam-se como factores determinantes no bom funcionamento térmico da fachada.

No caso de estudo *in situ*, o isolamento térmico das células experimentais consiste num sistema ETICS. Esta solução consiste na colocação de um isolamento térmico sobre a face exterior da parede. Quando o sistema de isolamento térmico está sujeito a uma exposição solar prolongada, podem originar-se vários problemas, desde a degradação da pintura até à perda das propriedades isolantes.

Um factor determinante na manutenção da funcionalidade do sistema é o isolante térmico - no caso constituído por poliestireno expandido moldado (EPS). Quando este é sujeito a uma energia calorífica elevada, como temperaturas permanentes superiores a 85°C, a estrutura celular do EPS começa a fundir, permitindo a saída do ar, causando consequentemente a perda de espessura e das propriedades isolantes [ACEPE, 2013].

Constata-se, com base nos resultados obtidos, que tintas reflectantes permitem baixar consideravelmente a temperatura das superfícies, diminuindo o risco de perda das propriedades isolantes do sistema ETICS, garantido a sua funcionalidade e longevidade.

A figura 5.34 revela a capacidade que cada cor e tipo de tinta têm de reflectir a radiação solar, permitindo melhorar o desempenho térmico dos elementos construtivos onde estão aplicadas. Verifica-se a existência de valores inferiores de temperatura em cores reflectantes (BrT e PrT).

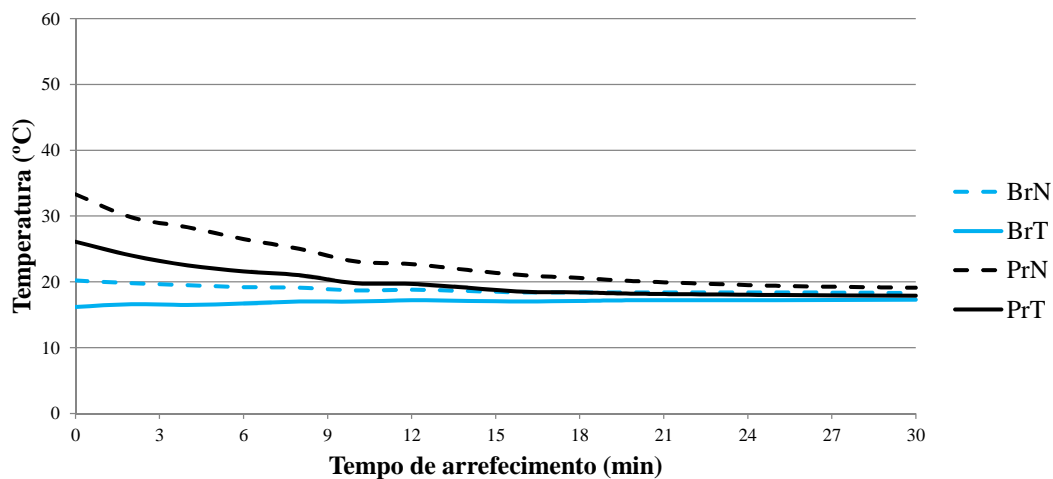


Fig. 5.34: Evolução da temperatura superficial do provete duo-cor após insolação

O provete duo-cor foi criado com o intuito de permitir observar, na mesma superfície, a diferença de comportamento entre tintas reflectantes e convencionais. Procedeu-se à irradiação deste provete com radiação solar e no ensaio anterior, com radiação infravermelha, pretendendo-se comprovar que tintas reflectantes funcionam apenas quando expostas a radiação solar.

Na figura 5.35 observa-se o comportamento do provete duo-cor, para a cor preta reflectante (PrT) e convencional (PrN), quando irradiado por radiação solar e por radiação infravermelha.

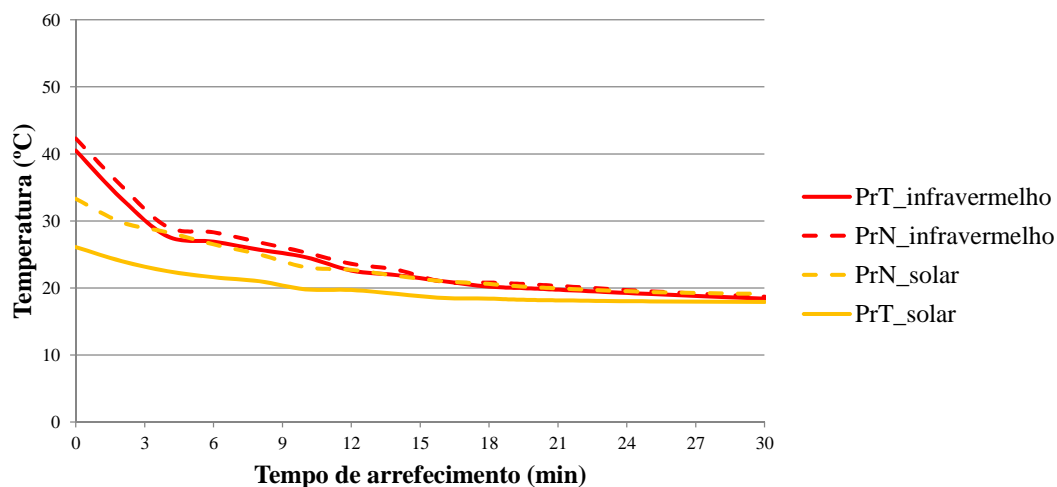


Fig. 5.35: Evolução da temperatura superficial para a cor preta após insolação e após radiação infravermelha

A primeira observação a efectuar é que o provete duo-cor irradiado por radiação solar revela a diferença de desempenho térmico entre a tinta reflectante e a convencional (valor inicial de 0 minutos). Quando o provete é irradiado por radiação infravermelha a temperatura do PrT é aproximadamente a do PrN ($\Delta T = 1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Quando sobre este incide radiação solar, acontece o contrário, sendo a temperatura do PrT diferente do PrN ($\Delta T = 7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$).

No aquecimento por radiação solar é possível observar, na prática, o que foi verificado em ensaios anteriores, como no ensaio de espectrofotometria. Nestes obtém-se elevada reflectância no Visível e

NIR. Tal traduz-se em menores valores de temperatura superficial e, consequentemente, na redução de possíveis ganhos térmicos pela fachada. Os resultados obtidos confirmam que as tintas reflectantes estudadas funcionam e apresentam melhor desempenho quando aplicadas em paramentos exteriores, onde estão expostas a radiação solar.

O que foi observado para a cor preta verificou-se igualmente para a cor branca e telha. Com efeito, quando o provete duo-cor foi sujeito a radiação infravermelha, a diferença de temperatura entre a tinta reflectante e convencional foi mínima. Tal como na cor preta, quando ambos os tipos de tinta foram sujeitos a radiação solar obtiveram-se valores de temperatura menores para a cor reflectante comparativamente à convencional.

O arrefecimento é idêntico em ambos tipos de tinta, convergindo para a temperatura ambiente, mais ou menos rápido, consoante o valor inicial de temperatura. O comportamento observado após o aquecimento é igual para tintas reflectantes e convencionais porque, tal como identificado em ensaios anteriores (aquecimento por condução e radiação infravermelha), o principal factor influenciador é a emitância.

Na figura 5.36 apresenta-se a sequência de termografias que demonstram o arrefecimento do provete duo-cor até próximo do equilíbrio térmico.

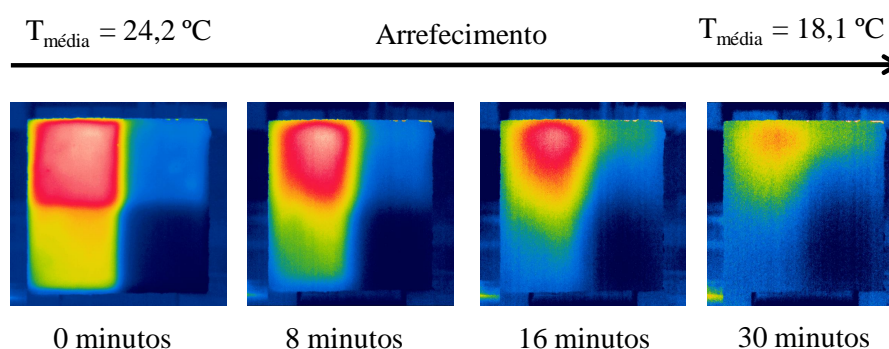


Fig. 5.36: Arrefecimento do provete duo-cor após insolação

No final do período de arrefecimento a superfície do provete duo-cor encontra-se praticamente à mesma temperatura, apresentando uma temperatura média de $18,1^{\circ}\text{C}$.

Pode concluir-se que a aplicação de tintas reflectantes em fachadas permite que estas aumentem a sua capacidade de reflectir a radiação solar, diminuindo as parcelas de radiação que é absorvida e transmitida através da parede. Esta situação tem um resultado prático: as temperaturas superficiais atingidas pela fachada são menores, melhorando desta forma, o desempenho térmico do conjunto.

No entanto não é possível quantificar o efeito benéfico das tintas reflectantes no desempenho térmico de uma fachada, visto que, no caso *in situ* deste trabalho, as paredes da célula experimental onde foram aplicadas as tintas apresentam uma elevada resistência térmica (secção 4.3.1 - Células experimentais), inviabilizando a quantificação do efeito real que estas tintas têm no desempenho térmico de um edifício.

5.2.4 Síntese dos resultados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da reflectância, total e direccional, permitiram concluir que tintas reflectantes apresentam valores de reflectância mais elevados do que as tintas

convencionais correspondentes. Verificou-se que a tinta reflectante apresenta reflectância mais elevada na região do infravermelho próximo (NIR), garantindo desta forma, uma reflectância total mais elevada na totalidade do espectro da radiação solar. Verificou-se igualmente que a incidência da luz, perpendicular à superfície, permite obter valores de reflectância mais elevados, aumentando à medida que se incrementa o ângulo de incidência da luz.

É perceptível que, para as mesmas condições exteriores, a aplicação de uma tinta reflectante poderá melhorar o desempenho térmico do suporte, quando comparada com uma tinta convencional da mesma cor. A baixa absorptância/elevada reflectância no NIR garante temperaturas superficiais mais baixas, atenuando desta forma, o fluxo de calor para o interior do edifício.

Em suma, verificou-se que as tintas reflectantes tem um bom comportamento quando expostas a radiação solar, uma vez que diminuem a temperatura superficial, o que por sua vez, se traduz num efeito positivo no desempenho térmico do edifício, em especial no período de Verão. O trabalho desenvolvido permitiu concluir igualmente que a termografia possibilita a avaliação qualitativa do desempenho térmico das tintas (reflectantes e convencionais) em laboratório. Neste contexto, pretende-se de seguida avaliar o desempenho térmico das tintas e do método termográfico em condições reais de exposição.

5.3 Condições reais

Em condições reais de exposição realizaram-se dois ensaios. O ensaio do piranómetro permitiu determinar a reflectância total das fachadas da célula experimental C5. Através da Termografia de infravermelhos foi possível avaliar o desempenho térmico das tintas reflectantes em condições de exposição reais, assim como, do método termográfico adoptado.

5.3.1 Reflectância total

A reflectância total foi determinada, em condições de exposição reais, com recurso a um piranómetro (figura 5.37). Diferenciaram-se os resultados em termos da orientação da parede, precisão das medições, envelhecimento natural, cor e tipo de tinta aplicados. Com os resultados obtidos com o piranómetro obteve-se a reflectância total de tintas reflectantes e convencionais, aplicadas nas paredes da célula experimental C5, em condições reais de exposição. Apenas as paredes Este, Sul e Oeste foram analisadas neste trabalho por estarem mais expostas ao Sol.



Fig. 5.37: Piranómetro utilizado na campanha *in situ*

Pretende-se que o ensaio realizado complemente a análise efectuada em condições controladas de laboratório das mesmas tintas, em provetes representativos da situação real (secção 5.2.1). Em paralelo, pretende-se averiguar a influência que a orientação solar, período do dia e envelhecimento natural têm na capacidade da fachada reflectir e, consequentemente, no desempenho térmico.

O quadro 5.24 resume as condições gerais do ensaio com piranómetro.

Quadro 5.24: Condições gerais de ensaio

Alcance do sensor	Parede	Radiação
até 1,1 μm	Insolada	Difusa + Directa
	Sombra	Difusa

A radiação reflectida refere-se à radiação que, ao ser reflectida pela parede, é captada pelo sensor, orientado para a superfície, medida a 1,5 cm da parede e a 1,5 m e 0,7 m do solo. A radiação global é entendida como a radiação incidente, medida com o sensor na horizontal, orientado ao céu.

A figura 5.38 representa a radiação incidente (difusa + directa) e a componente que é reflectida pela parede, cuja proporção está dependente da reflectância da camada de acabamento da parede, neste caso do sistema de pintura e das tintas aplicadas.



Fig. 5.38: Representação da radiação incidente e reflectida na célula experimental C5

Na figura 5.38 não se representa a componente da radiação reflectida em outros elementos, como paredes ou o terreno, porque as células experimentais encontram-se posicionadas de forma a diminuir essa componente (reflexão de outras paredes) e a parcela reflectida pelo terreno foi minorada ao efectuar medições a uma altura superior.

Os ganhos térmicos de um edifício são constituídos pelos ganhos solares, através dos vãos envidraçados ou da superfície opaca. A forma mais simples e eficaz de reduzir os ganhos térmicos nas edificações passa por controlar a radiação solar que atinge a superfície ou reduzir a sua absorção pelo edifício.

O piranómetro permite quantificar, em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, a radiação que está a incidir e reflectir na superfície da parede, dentro do alcance espectral do sensor (400 a 1100 nm). Desta forma é possível avaliar o

comportamento térmico da parede ao longo do ciclo solar: do nascer ao pôr-do-sol, utilizando como parâmetro de caracterização deste comportamento, a variação da reflectância determinada em função da radiação incidente e reflectida pela parede.

Seguidamente apresentam-se os valores de reflectância total obtidos em três períodos do dia avaliados: 10h30; 13h30 e 16h30. Em cada campanha ou período do dia registou-se, igualmente, a temperatura ambiente e humidade relativa, como apoio à análise dos resultados, visto que se trata de um ensaio *in situ*.

A figura 5.39 apresenta a evolução da radiação global ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) e da temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), parâmetros medidos na estação meteorológica do LNEC (secção 4.3.1), no dia do ensaio.

Os valores de reflectância total e radiação incidente apresentados no quadro 5.25 correspondem a valores médios obtidos a partir de três medições consecutivas.

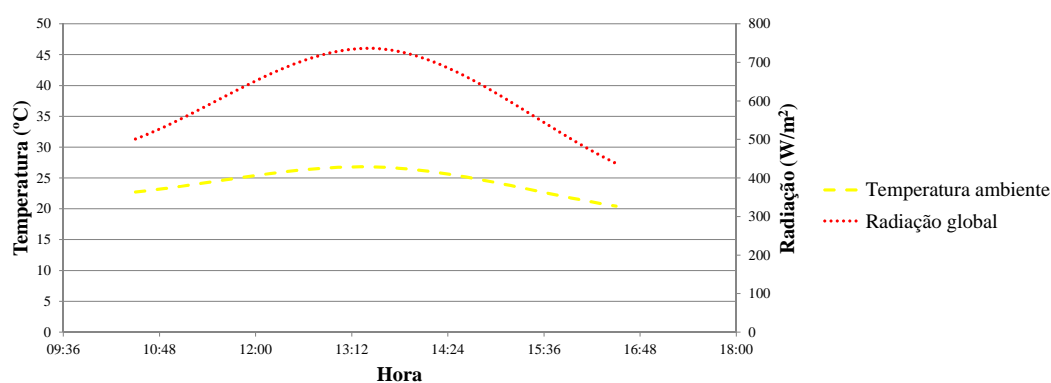


Fig. 5.39: Evolução da radiação global e temperatura ambiente no dia do ensaio

Quadro 5.25: Reflectância total (R_{total}) e correspondente radiação incidente (Rad_{incid}) nas diferentes orientações e campanhas

Parede	Tinta	R_{total} (%)			
		10h30	13h30	16h30	Dia
Este	PrT	36,0	31,3	23,5	30,3
	TeT	36,7	28,5	25,8	30,3
	BrT	77,2	52,9	55,7	61,9
	Rad_{incid} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	701,8	115,4	82,5	299,9
Sul	PrT	40,7	34,4	40,2	38,4
	TeT	41,9	34,5	40,4	38,9
	BrT	80,4	67,3	78,3	75,4
	Rad_{incid} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	566,6	795,3	573,6	645,2
Oeste	PrT	33,3	42,1	31,7	35,7
	TeT	26,5	37,6	30,3	31,5
	BrT	47,8	74,0	60,2	60,7
	PrN	4,6	11,0	4,8	6,8
	TeN	22,8	32,7	28,8	28,1
	BrN	42,7	67,4	53,3	54,4
	Rad_{incid} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	73,2	216,1	719,2	336,2

Sintetizando os resultados do quadro 5.25 por orientação para a cor BrT, obtém-se as seguintes conclusões relativamente a cada orientação:

- Parede Este - Apresenta valores de reflectância mais elevados de manhã porque está insolada, mas nas campanhas, 13h30 e 16h30 tem valores menores porque está à sombra. Máximo de reflectância (BrT) : 77,2% às 10h30. Observa-se que radiação incidente atinge o máximo às 10h30 ($\approx 700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).
- Parede Sul - Quando o sol está mais baixo (10h30 e 16h30) o BrT apresenta valores de reflectância mais elevados do que quando este está mais alto (13h30). Máximo de reflectância (BrT) : 80,4% às 10h30. Observa-se que radiação incidente atinge o máximo às 13h30 ($\approx 794 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).
- Parede Oeste - Apresenta valores de reflectância mais elevados às 13h30 e mais baixos nos períodos das 10h30 e 16h30. Máximo de reflectância (BrT): 74,0% às 13h30. Observa-se que radiação incidente atinge o máximo às 16h30 ($\approx 720 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Cor

Tratando-se de superfícies expostas à radiação solar, a cor que estas apresentam desempenha um papel importante no controlo dos ganhos térmicos pela envolvente opaca do edifício. Exemplificando para as cores extremas, branco reflectante (BrT) e preto reflectante (PrT), nas figuras 5.40 e 5.41 e no quadro 5.25, é possível observar a variação da reflectância total ao longo do dia, nas três orientações analisadas.

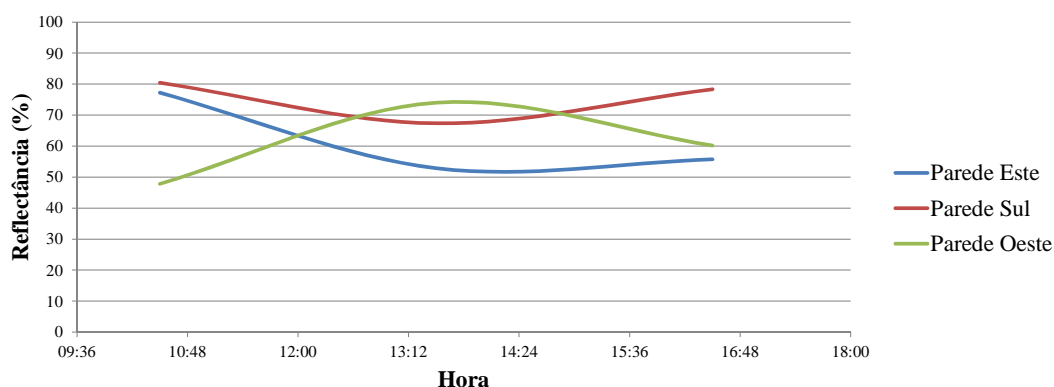


Fig. 5.40: Variação da reflectância total para a cor branco reflectante (BrT)

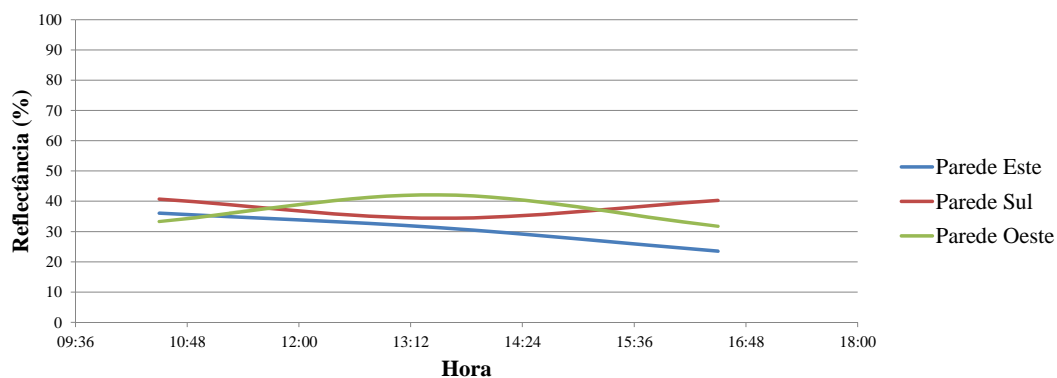


Fig. 5.41: Variação da reflectância total para a cor preto reflectante (PrT)

O comportamento ao longo do dia é semelhante quando se compara as cores branca e preta reflectantes. Na parede Oeste ocorre um pico de reflectância às 13h30; a Este e Sul obtêm-se valores máximos no início e final do dia (10h30 e 16h30).

No quadro 5.26 apresentam-se os valores de reflectância total quando a superfície é insolada o dia inteiro (situação verificada para a parede Sul).

Quadro 5.26: Reflectância total das cores preto reflectante (PrT) e branco reflectante (BrT) na parede Sul

Parede Sul	$R_{total} (\%)$			
	10h30	13h30	16h30	Dia
PrT	40,7	34,4	40,2	38,4
BrT	80,4	67,3	78,3	75,4

Comparando a cor PrT e BrT constata-se que a variação da reflectância não é tão elevada no PrT, apresentando maior constância de resultados ao longo do dia. A variação máxima na parede Sul é de 6,3 % para o PrT, enquanto que no BrT é mais elevada, fixando-se a variação máxima em 13,1%.

Em determinadas orientações, dependendo da altura do dia, a parede fica insolada ou à sombra. A parede Este e Oeste são disto exemplo. Analisando a parede Este verifica-se que a variação da reflectância não é tão elevada no PrT porque, estando à sombra ou não, a variação máxima é de 12,5 %, enquanto que no BrT é mais elevada, fixando-se a variação máxima em 21,5 % (quadro 5.25). Tal significa que o BrT é mais facilmente afectado pela variação da radiação incidente do que o PrT, apresentando um comportamento mais reactivo. Embora varie, a cor preta nunca varia como o branco. Este comportamento já tinha sido observado no ensaio de reflectância direcciona (secção 5.2.2).

Dos resultados obtidos surge uma questão pertinente. Qual a razão de se observar valores máximos de reflectância em alturas do dia para as quais se verifica menos radiação incidente?

Tomando como exemplo desta situação a parede Oeste e a cor BrT, verifica-se que os dados obtidos indicam um máximo de reflectância de 74,0% às 13h30 e que a radiação incidente é apenas $\approx 215 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Quando se analisa o período das 16h30, verifica-se (para a mesma parede e cor) um valor de radiação incidente maior ($\approx 720 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) mas a reflectância é de apenas 60,2 %.

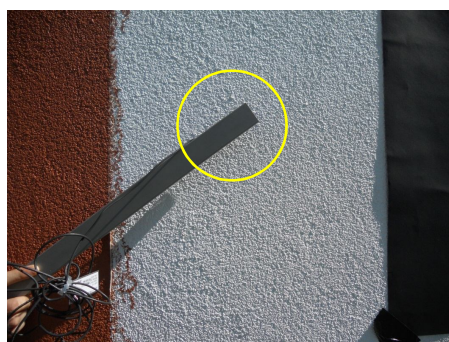


Fig. 5.42: Parede Oeste às 13h30

A explicação reside, em parte, no curso solar. A posição do Sol afecta a leitura da radiação reflectida, pelo facto de provocar mais ou menos sombra na parede. Embora às 13h30 na parede Oeste esteja a

incidir menos radiação solar, o facto de a posição do Sol, nesta altura do dia, não provocar sombra do equipamento na parede, permite obter um valor de reflectância mais preciso (visível na figura 5.42).

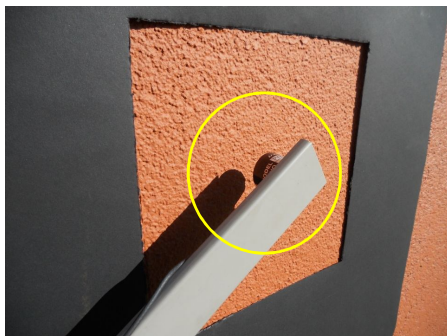


Fig. 5.43: Parede Oeste às 16h30

Como é possível observar na figura 5.43, na parede Oeste às 16h30, o sensor provoca mais sombra na parede, afectando o valor da medição que é mais baixo, embora a radiação incidente seja superior. Esta situação é observada nas restantes orientações e cores.

A maior ou menor sombra na parede afecta a precisão das medições pois o piranómetro mede a radiação reflectida hemisférica, isto é, capta a radiação proveniente da parede na forma de um hemisfério abaixo do sensor. Quanto mais próximo estiver da parede (1,5 cm), menor será a interferência de outras fontes de radiação.

Por essa mesma razão, utilizou-se uma protecção de coloração negra (figuras 5.43 e 5.44) aquando da medição da radiação reflectida, com o intuito de diminuir a contribuição de radiação reflectida de outras fontes (como, por exemplo, da tinta reflectante que rodeia o quadrado pintado com tinta convencional), melhorando assim a qualidade da leitura.

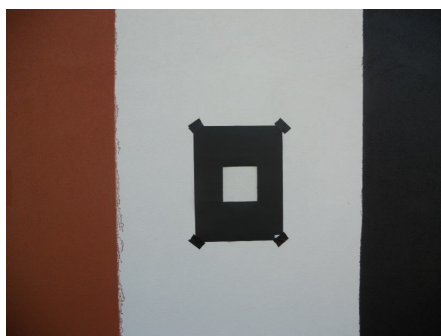


Fig. 5.44: Protecção da área a ser analisada

Orientação da Parede

A posição do Sol influencia a intensidade da radiação directa sobre fachadas e coberturas. De acordo com o curso do Sol e as diferentes estações do ano, a intensidade da radiação solar varia consideravelmente entre orientações, como representado no gráfico da figura 5.45.

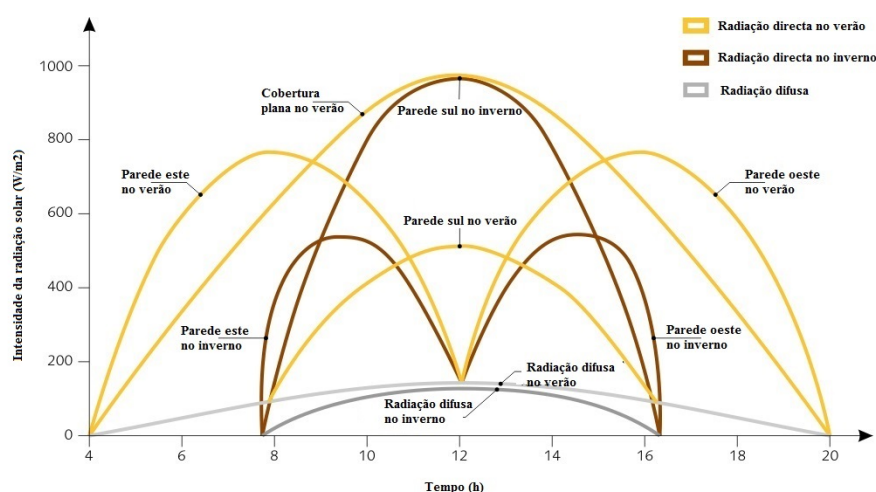


Fig. 5.45: Variação da intensidade da radiação solar em função da orientação e estação do ano adaptado de [GLUCKLICH, 2013]

O ensaio foi realizado no período de Inverno, mais precisamente no dia 8 de Outubro de 2013. Da figura 5.45 entende-se que, em período de Inverno e para o hemisfério norte, obtêm-se valores máximos de radiação directa incidente na parede Sul próximo do meio-dia (12h), na parede Este às 10h e na parede Oeste às 16h.

No quadro 5.27 apresentam-se os valores médios de radiação incidente medidos em cada parede ao longo dos três períodos de medição ou campanhas.

Quadro 5.27: Radiação incidente nas três orientações para as três campanhas

		Rad _{incid} (W · m ⁻²)		
Parede	Tinta	10h30	13h30	16h30
Este	BrT	709,8	114,2	81,2
	TeT	697,7	113,4	91,3
	PrT	697,9	118,7	75,0
	Média	701,8	115,4	82,5
Sul	BrT	566,0	800,9	581,9
	TeT	570,2	786,5	565,3
	PrT	563,6	798,6	573,7
	Média	566,6	795,3	573,6
Oeste	BrT	67,1	211,0	721,7
	TeT	62,9	231,7	731,2
	PrT	78,6	202,9	716,4
	BrN	70,4	214,9	720,3
	TeN	65,0	229,1	730,0
	PrN	84,4	204,3	707,4
	Média	73,2	216,1	719,2

Analisando o quadro 5.27 e sabendo que a célula experimental C5 está localizada no hemisfério Norte, é possível estabelecer uma relação entre a orientação e a intensidade da radiação, tendo em conta que se trata do período de Inverno:

- Parede Este - Apresenta valores mais elevados de radiação directa no período da manhã (10h30). Este facto é explicado pela posição mais baixa do Sol, mais próximo da normal à superfície, incidindo na fachada durante poucas horas do período da manhã. Tal como no ensaio de reflectância direcciona (secção 5.2.2) quanto mais perpendicular à superfície, maior é iluminância, neste caso irradiância.
- Parede Sul - Como foi observado na orientação anterior, a posição do Sol permite que a radiação directa seja mais intensa ao meio-dia. Uma vez que o percurso do Sol no Inverno se efectua para azimutes muito próximos do Sul geográfico, a parede Sul encontra-se insolada durante longos períodos.
- Parede Oeste - Tal como a parede Este, o facto do Sol estar mais próximo da normal à superfície, origina valores mais elevados de radiação directa no período da tarde (16h30).

Os resultados obtidos (figura 5.46) permitem perceber, na prática, as conclusões sintetizadas na figura 5.45. A semelhança entre os gráficos das figuras 5.45 e 5.46 validam os dados obtidos por este ensaio, permitindo considerar o método usado como adequado na obtenção da reflectância total.

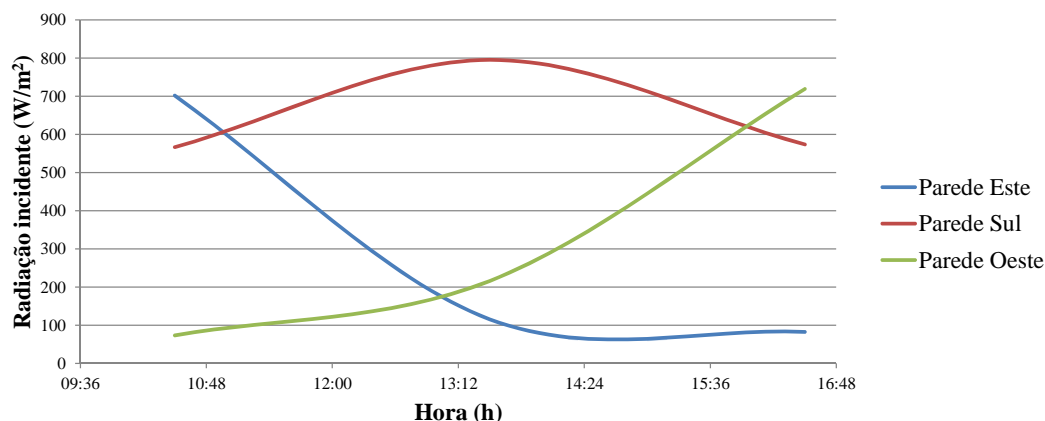


Fig. 5.46: Variação da intensidade da radiação incidente em função da orientação da parede

Tipo de tinta

A única parede na qual se aplicaram dois tipos de tinta (reflectante e convencional) foi a parede Oeste. Sensivelmente a 1,20 m do terreno criou-se, em cada faixa vertical pintada com tinta reflectante, um quadrado com 20x20 (cm), identificado a amarelo na figura 5.47. Este quadrado foi pintado com tinta convencional da mesma cor da faixa onde está inserido.

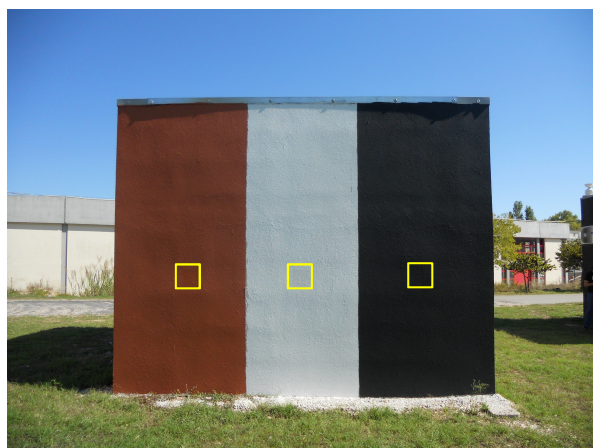


Fig. 5.47: Localização dos quadrados pintados com tintas convencionais na parede Oeste

Desta forma é possível avaliar os dois tipos de tinta ao mesmo tempo, no mesmo tipo de superfície, em condições atmosféricas idênticas.

Analisando a figura 5.48 verifica-se que as superfícies pintadas com tintas reflectantes apresentam valores superiores de reflectância quando comparadas com tintas convencionais da mesma cor. Esta diferença é mais acentuada na cor preta, sendo que o PrT reflecte aproximadamente mais 31% que o PrN, mantendo-se esta diferença praticamente constante ao longo do dia. Esse comportamento já tinha sido identificado em ensaios anteriores, como no ensaio de espectrofotometria (secção 5.2.1). Foi verificado que, para comprimentos de onda na faixa espectral do NIR, a reflectância do PrT aumenta significativamente, enquanto que o PrN permanece constante em toda a faixa espectral da radiação solar.

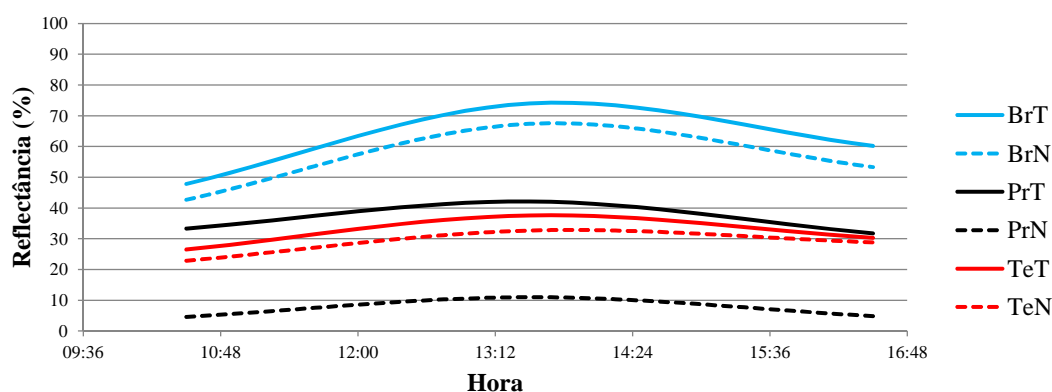


Fig. 5.48: Evolução da reflectância total das diferentes tintas ao longo do período ensaiado, na parede Oeste

Na prática, reflectância elevada traduz-se em temperaturas superficiais mais baixas, conforme foi verificado nos ensaios laboratoriais de aquecimento por radiação solar (secção 5.2.3). Nesse mesmo ensaio, para a cor preta foi obtida uma diferença de temperatura máxima entre o PrT e PrN de 7,2 °C (quadro 5.22), confirmando que existe uma diferença acentuada de reflectância entre tintas, em especial para comprimentos de onda na região do infravermelho próximo.

Precisão

A avaliação de uma superfície continuamente insolada torna-se especialmente relevante visto permitir determinar a reflectância ao longo do dia sem sombreamento. A parede Sul é a única que se encontra nessa situação. Apresenta-se, de seguida, o valor médio de reflectância ao longo das três campanhas de medição (10h30, 13h30 e 16h30) na parede Sul para as três cores:

- BrT = 75,4 %
- PrT = 38,4 %
- TeT = 38,9 %

Como seria de esperar a cor branca reflectante (BrT) apresenta um valor muito superior ao das outras duas cores, situação que já tinha sido verificada em outros ensaios (secção 5.2.1 - Espectrofotometria e esfera integradora). Verifica-se também que não existe grande diferença entre o preto (PrT) e telha (TeT) reflectantes.

Tal como foi referido anteriormente existem períodos do dia onde a medição é menos precisa, devido às limitações inerentes ao facto de ser um ensaio *in-situ*. A posição do Sol (mais alta ou baixa) no momento da leitura, provoca mais ou menos sombra na parede, que consequentemente afecta o valor de reflectância. Tendo em conta este fenómeno, para cada orientação apresenta-se no quadro 5.28 os valores de reflectância menos afectados.

Quadro 5.28: Valores de reflectância obtidos com sombreamento reduzido

Parede	Campanha	Tinta	R _{total} (%)
Este	10h30	BrT	77,2
		PrT	36,0
		TeT	36,7
Sul	10h30	BrT	80,4
		PrT	40,7
		TeT	41,9
Oeste	13h30	BrT	74,0
		PrT	42,1
		TeT	37,6
		BrN	67,4
		PrN	11,0
		TeN	32,7

Analisando os resultados obtidos nos períodos do dia onde as medições são menos afectadas pela sombra do sensor, verifica-se que, tal como seria expectável, uma tinta reflectante reflecte mais que uma tinta convencional. Normalmente assume-se que um revestimento cuja cor seja branca é suficiente para garantir um bom desempenho térmico. No entanto, a cor branca é apenas garantia de uma elevada reflectância solar nos comprimentos de onda correspondentes à luz visível, o que, só por si, não garante uma boa reflexão na zona dos infravermelhos, responsável por $\approx 50\%$ da energia recebida na superfície terrestre.

É importante referir que o equipamento utilizado permite medir até 1100 nm de comprimento de onda, o que inclui parte considerável do espectro solar, particularmente as regiões mais interessantes (Visível e parte do NIR).

Tal como foi referido anteriormente, a constituição química e física das tintas reflectantes permite que se obtenham valores de reflectância mais elevados no NIR. Este facto explica os resultados obtidos por exemplo, na parede Oeste, onde foram aplicados os dois tipos de tintas (reflectantes e convencionais), verificando-se que independentemente da cor, a tinta reflectante apresenta valores de reflectância superiores à tinta convencional.

Tendo em conta os resultados obtidos é plausível afirmar que uma tinta reflectante pode melhorar o comportamento térmico de um edifício e, consequentemente o nível de conforto dos seus ocupantes, no período de Verão. A sua influência no desempenho térmico é tanto maior, quanto menor for o isolamento térmico do edifício, assim como a sua inércia térmica.

Da aplicação de tintas reflectantes em fachadas surge uma questão prática e pertinente. Terá uma tinta reflectante a mesma durabilidade/longevidade que a tinta convencional correspondente? Para averiguar a relevância desta questão, desenvolveu-se um simples ensaio de envelhecimento natural, utilizando como método de avaliação, o piranómetro.

Envelhecimento natural

No decorrer do presente estudo, o provete duo-cor (secção 4.2.2) foi colocado a envelhecer naturalmente durante um período de, cerca de, sete meses. Desta forma, foi possível verificar se a exposição contínua às condições climáticas, em particular, à radiação solar, alterava a capacidade reflectante das tintas em estudo. Conforme apresentado na figura 5.49, o provete duo-cor foi colocado no exterior, ligeiramente inclinado, orientado a Sul, de modo a maximizar a sua exposição solar.



Fig. 5.49: Provete duo-cor a envelhecer naturalmente

Pretende-se com este ensaio, verificar se existe diferença do valor de reflectância, quando se compara a reflectância das tintas aplicadas no provete duo-cor (envelhecido) com a dos provetes individuais usados nos ensaios de aquecimento (quadro 4.5), nunca antes expostos ao Sol.

Nesse sentido, os provetes BrN, BrT, PrN e PrT foram colocados no exterior, junto ao provete duo-cor, estando desta forma, sujeitos às mesmas condições de exposição, durante o período de medição.

Utilizando a mesma metodologia do ensaio do piranómetro (vd. secção 4.3.2), efectuaram-se apenas duas campanhas de medição às 14h30 e 16h30.

O quadro 5.29 apresenta os valores de reflectância obtidos, resultado da média de três medições consecutivas, recolhidas com os provetes na vertical, de forma a simular a parede da célula experimental C5.

Quadro 5.29: Valores de reflectância do provete envelhecido (duo-cor) e dos provetes individuais correspondentes

Proвете	R_{14h30} (%)	R_{16h30} (%)
BrT _{env}	71,4	69,9
BrN _{env}	52,1	54,2
PrT _{env}	31,9	32,7
PrN _{env}	7,4	9,3
BrT	71,3	77,7
BrN	63,6	65,0
PrT	34,8	36,9
PrN	6,1	7,6

Os resultados obtidos revelam que a cor preta apresenta menores variações de reflectância entre o provete envelhecido e não envelhecido, quando comparada com a cor branca. Este facto, é facilmente perceptível no quadro 5.30, onde se apresentam as diferenças de reflectância entre o provete duo-cor (envelhecido) e os provetes individuais correspondentes (não envelhecido), nas duas campanhas realizadas.

Quadro 5.30: Diferença de reflectância entre o provete duo-cor envelhecido e provetes individuais correspondentes

Campanha	$\Delta R_{BrT-BrT_{env}}$ (%)	$\Delta R_{BrN-BrN_{env}}$ (%)	$\Delta R_{PrT-PrT_{env}}$ (%)	$\Delta R_{PrN-PrN_{env}}$ (%)
14h30	-0,2	11,5	2,9	-1,3
16h30	7,8	10,8	4,3	-1,7

Verifica-se que a tinta BrN (branco convencional) apresenta a maior redução do valor de reflectância, depois de envelhecida. A tinta BrT também apresenta uma diminuição considerável na reflectância, embora apenas para a campanha das 16h30. Ambas as situações são explicadas, em parte, pela acumulação de sujidade na superfície e devido ao desgaste, provocado pela acção erosiva dos agentes climáticos, como o vento e a chuva. Neste caso, a retenção de sujidade revela ser o factor determinante na redução da reflectância, principalmente, na cor branca, tornando mais escura. Na cor preta, o efeito negativo, derivado da acumulação de sujidade é atenuado, visto a superfície já ser escura.

Os resultados obtidos são os expectáveis, pois o tempo de exposição aos agentes climáticos (raios UV, temperatura, vento, precipitação) foi relativamente curto (sete meses). Este facto não permite uma degradação maior da superfície, não sendo possível estabelecer a sensibilidade deste tipo de tintas à acção dos agentes referidos. A maior ou menor degradação da superfície, seria traduzida pela redução ou não, do valor de reflectância.

5.3.2 Termografia de infravermelhos

Efectuados os ensaios de caracterização das tintas reflectantes e convencionais em laboratório (secção 5.2) procedeu-se à sua avaliação, em condições reais de exposição, quando aplicadas em fachadas do

tipo ETICS. Para esse efeito, recorreu-se à Termografia de infravermelhos como método de análise do desempenho térmico de tintas reflectantes e tintas convencionais da mesma cor. Pretende-se com este ensaio verificar o desempenho das tintas em estudo, no contexto real de aplicação, averiguando a aplicabilidade do método e a qualidade dos resultados obtidos.

Em ensaios anteriores, como o ensaio de piranómetro (secção 5.3.1), avaliou-se a reflectância solar das superfícies pintadas com tintas reflectantes e convencionais. A Termografia permite visualizar instantaneamente, o efeito prático das características (avaliadas) dos materiais, como a reflectância e emitância, através da medição da temperatura superficial da parede.

Com o intuito de perceber a influência das condições atmosféricas no desempenho, não só das tintas mas também do próprio método termográfico, efectuaram-se três inspecções termográficas nas fachadas Sul e Oeste da célula experimental C5 (figura 5.50). Para cada inspecção termográfica é realizada uma análise qualitativa e uma análise quantitativa, dos resultados obtidos.

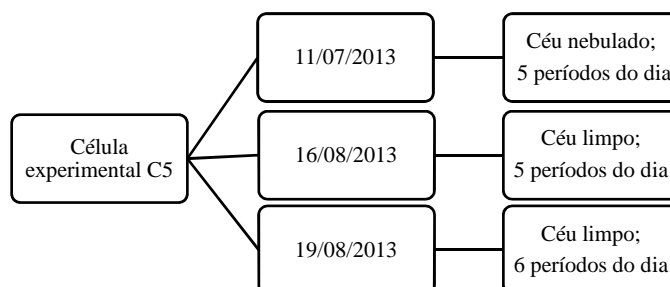


Fig. 5.50: Inspecções termográficas efectuadas

As duas primeiras inspecções termográficas foram realizadas com condições atmosféricas diferentes mas nos mesmos períodos do dia: 11h, 13h, 16h, 18h30 e 20h30. Na última inspecção, foi realizada uma campanha suplementar às 19h30, devido a grande variação da luminosidade entre as 18h30 e 20h30.

Os resultados individuais de temperatura superficial obtidos por Termografia e pelos termopares, relativos às três inspecções termográficas, encontram-se no Anexo A, no final deste trabalho.

1ª Inspecção termográfica: 11/07/2013

A inspecção termográfica realizada desenvolveu-se com céu nebulado (figura 5.51), tendo como objectivo avaliar a influência deste tipo de condições meteorológicas no desempenho das tintas em estudo, assim como da técnica termográfica.



Fig. 5.51: Condições meteorológicas às 11h - 1ª inspecção

Para apoio do diagnóstico termográfico recorreu-se aos termopares instalados nas paredes Sul e Oeste. Estes dispositivos registam, de 10 em 10 minutos, a temperatura superficial da parede (vd secção 4.3.1). Tendo por base, a temperatura registada pelos termopares, é possível averiguar a precisão/fiabilidade dos resultados obtidos pela Termografia.

Nos quadros 5.31 e 5.32 apresentam-se as temperaturas superficiais medidas pelo método termográfico e pelos termopares, nas fachadas Sul e Oeste, para as diferentes tintas aplicadas. A emitância ($\varepsilon = 0,89$ e $\varepsilon = 0,90$) usada na configuração da câmara termográfica resulta de ensaios efectuados anteriormente (secção 4.2.2). Os restantes parâmetros de configuração dependem das condições atmosféricas e da metodologia, sendo por isso averiguados no momento de ensaio.

Quadro 5.31: Temperatura superficial na parede Sul da célula experimental C5 obtida por termografia e termopares

Hora	T_{termografia} (°C)			T_{termopar}(°C)			ΔT_{superficial} (%)		
	PrT	BrT	TeT	PrT	BrT	TeT	PrT	BrT	TeT
11:37	34,2	28,1	35,9	32,7	25,9	32,2	5	8	10
14:20	50,2	35,8	48,5	48,0	34,8	47,2	4	3	3
16:33	40,2	30,5	38	39,1	30,2	37,6	3	1	1
18:53	29,1	24,5	27,2	28,3	24,3	27,2	3	1	0
20:40	21,2	20,8	21,3	20,5	19,9	20,5	3	4	4

Quadro 5.32: Temperatura superficial na parede Oeste da célula experimental C5 obtida por termografia e termopares

Hora	T_{termografia} (°C)						T_{termopar}(°C)			ΔT_{superficial} (%)		
	TeN	BrN	PrN	TeT	BrT	PrT	TeT	BrT	PrT	TeT	BrT	PrT
11:21	32,4	27,4	35,9	31,7	26,9	33,1	30,3	25,2	30,9	4	6	7
14:01	37,6	32,2	45,3	36,8	31,4	41,0	35,8	29,5	36,2	3	5	12
16:18	55,5	38,7	63,4	53,4	37,2	54,2	52,2	36,7	52,9	2	1	2
18:43	56,5	36,8	67,4	55	35,1	57,0	55,4	35,7	58,2	1	1	1
20:31	21,5	20,8	21,9	21,5	20,8	21,8	21,4	20,2	21,7	1	3	1

As diferenças entre os valores obtidos com os termopares e com a termografia devem-se, em grande parte, ao facto dos termopares estarem localizados em sítios específicos da parede e as medições da termografia não coincidirem exactamente com esses pontos. Outro factor é a hora a que são efectuadas as

termografias e a hora a que o termopar regista a temperatura. A termografia é efectuada, por exemplo, às 11:37 mas como o termopar regista a temperatura com intervalos fixos, pode ocorrer um desfasamento de 3/5 minutos entre medições. Sendo um ensaio *in situ*, este é sujeito às condições atmosféricas existentes na altura, como o vento, a radiação solar, a temperatura ambiente, que num espaço de minutos variam muito rapidamente, influenciando directamente um ensaio com estas características.

Os dados recolhidos revelam que, embora condicionado por ser um ensaio *in situ*, o método termográfico permite uma boa aproximação. Observa-se que a diferença, entre as temperaturas obtidas pela termografia e pelos termopares, é no máximo de 12 % nas duas orientações, mas em termos médios, a diferença é pouco significativa, isto é, para todas as medições efectuadas no dia, é de apenas 3,3 % (parede Oeste) e 3 % (parede Sul). Na prática, a diferença entre a temperatura superficial obtida pela Termografia e pelos termopares, ao longo da inspecção cinge-se a 1 °C.

Por esta mesma razão, é plausível admitir que a Termografia de infravermelhos pode ser utilizada para a análise, não só qualitativa mas também quantitativa da qualidade térmica de edifícios. Especial atenção deve ser dada ao facto deste tipo de análise termográfica depender de vários factores, que se devem ter em consideração para que o diagnóstico seja o mais correcto e exacto.

Análise qualitativa

Tal como foi referido anteriormente, a análise qualitativa obtida por Termografia baseia-se na avaliação comparativa dos termogramas obtidos e na identificação de eventuais problemas no elemento em análise (secção 3.2.4). Centrando a análise na parede Oeste, pelo facto de existirem áreas pintadas com ambos os tipos de tintas (reflectantes e convencionais), é possível com relativa facilidade tirar ilações acerca da constituição e desempenho térmico da parede.

Na figura 5.52 apresentam-se apenas as termografias da parede Oeste, em quatro alturas diferentes do dia: 11h, 13h, 18h30 e 20h30.

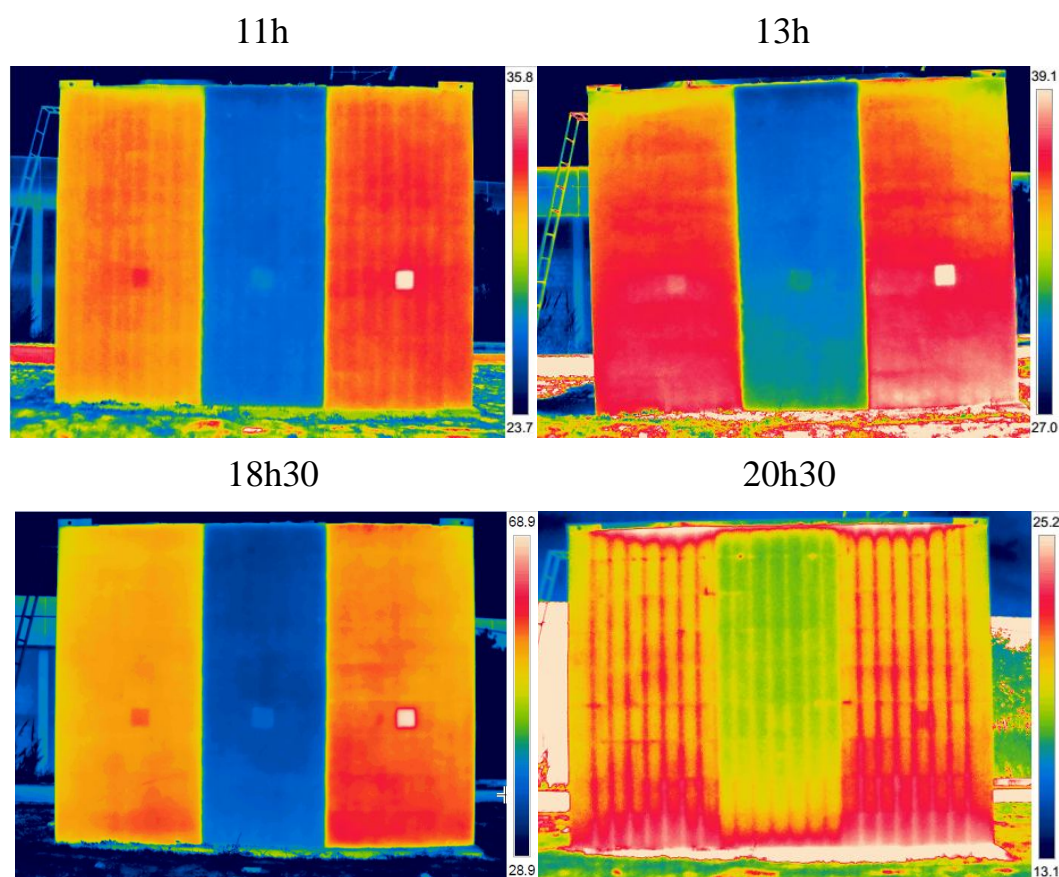


Fig. 5.52: Comparação de quatro termogramas da parede Oeste, em quatro períodos do dia diferentes

A análise quantitativa baseia-se na comparação entre diferenças de temperatura entre materiais. Para possibilitar a comparação directa entre termogramas definiu-se um intervalo de temperatura (δT) de $12,1^{\circ}\text{C}$, para as campanhas das 11h, 13h e 20h30. Devido à grande amplitude de temperaturas na parede Oeste às 18h30, aumentou-se o δT para 40°C . As quatro termografias apresentadas permitem desde já concluir, que se têm efectivamente aplicados dois tipos de tinta e três cores diferentes na parede. Os padrões de cor da termografia identificam zonas mais quentes ou mais frias, permitindo perceber as alturas do dia em que a parede está mais quente, que zonas aquecem mais e o porquê destas estarem mais quentes.

Principalmente nas três primeiras termografias (11h, 13h e 18h30), as zonas mais quentes correspondem a zonas pintadas com cores mais escuras e tintas convencionais (quadrados). Na última termografia (20h30), obtida numa altura dia onde a incidência solar é mais reduzida ($\approx 27,09 \text{ W/m}^2$), verifica-se uma distribuição cromática mais uniforme, pelo facto de nessa altura já não haver radiação incidente e a parede encontrar-se a emitir a energia acumulada ao longo do dia. Sabendo que a emitância das tintas é muito semelhante, e que se trata do mesmo material, é esperado que apresentem temperaturas superficiais idênticas, que se traduz na termografia em cores idênticas.

As análises termográficas também permitiram identificar a constituição da parede, principalmente na última termografia (20h30). Identifica-se a estrutura em bloco da parede, as armaduras presentes no seu interior e zonas mais quentes correspondentes; junto ao solo, às travessas de betão e no topo, as zonas da cobertura menos isoladas. Analisando as diferentes termografias percebe-se que a melhor altura

para avaliar o desempenho térmico das tintas em estudo é ao final do dia, quando a parede começa a arrefecer, tirando partido das diferentes propriedades térmicas dos materiais (inércia térmica, resistência térmica, condutibilidade térmica) que permitem um aquecimento/arrefecimento mais ou menos rápido. A maior, ou menor, emissão de energia térmica dos vários constituintes da parede é captada pela câmara termográfica que traduz, em imagens termográficas, as zonas na superfície mais quentes e frias.

Análise quantitativa

Tal como foi referido anteriormente (secção 3.2.4), a análise quantitativa implica uma quantificação precisa da temperatura superficial ou da sua distribuição. Por essa mesma razão é necessário configurar correctamente a câmara termográfica com todos os parâmetros. A informação proveniente das termografias é complementada por dados meteorológicos, que auxiliam o investigador na análise termográfica.

Para identificar a diferença entre tintas reflectantes e convencionais, recorre-se aos dados termográficos obtidos da parede Oeste, visto apenas nesta se encontrarem aplicadas ambos os tipos de tinta. Os dados recolhidos para este tipo de análise correspondem a termografias efectuadas a 2 metros de distância da parede, diminuindo desta forma, o erro associado à atenuação atmosférica e aumentando a resolução.

De seguida apresentam-se as termografias efectuadas na parede Oeste, nas faixas verticais branca (figuras 5.53, 5.55, 5.57 e 5.59) e preta (figuras 5.54, 5.56, 5.58 e 5.60), respectivamente às 11h, 13h, 18h30 e 20h30. Antes de cada campanha, a câmara termográfica é configurada consoante as condições termo-higrométricas e materiais avaliados. Os parâmetros introduzidos para as quatro campanhas termográficas são apresentados no quadro 5.33.

Quadro 5.33: Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - Dia 11/07/2013

Parâmetros	11h	13h	18h30	20h30
ε	0,89 (tinta reflectante)			
	0,90 (tinta convencional)			
HR (%)	76	67	69	85
D_{obj} (m)	2	2	2	2
$T_{refl} = T_{atm}$ (°C)	20,5	24,3	23,8	19,4

Na figura 5.53 apresenta-se a sobreposição da imagem real com a imagem termográfica, das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical da parede de cor branca. Definiu-se um $\delta T = 4^{\circ}\text{C}$, para se obter uma resolução máxima. A área de medição 1 (Ar1), situa-se sobre o quadrado pintado com tinta convencional (BrN) e a área de medição 2 (Ar2) sobre a superfície correspondente à cor reflectante (BrT). A sobreposição da imagem real com a termográfica, facilita a leitura do termograma e sua interpretação.

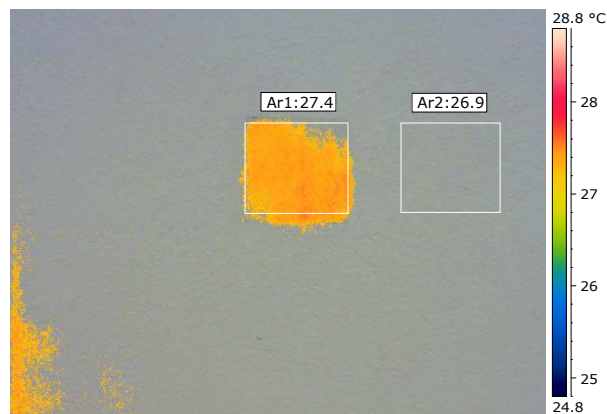


Fig. 5.53: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 11h

A figura 5.54 apresenta o mesmo exercício para a cor preta.

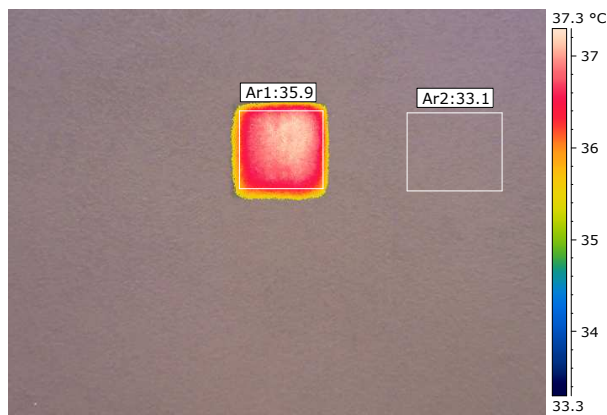


Fig. 5.54: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 11h

Relativamente à campanha termográfica das 13h, as figuras 5.55 e 5.56 apresentam a sobreposição da imagem real com a termográfica, das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical da parede de cor branca e preta, mantendo-se igualmente $\delta T = 4^{\circ}\text{C}$.

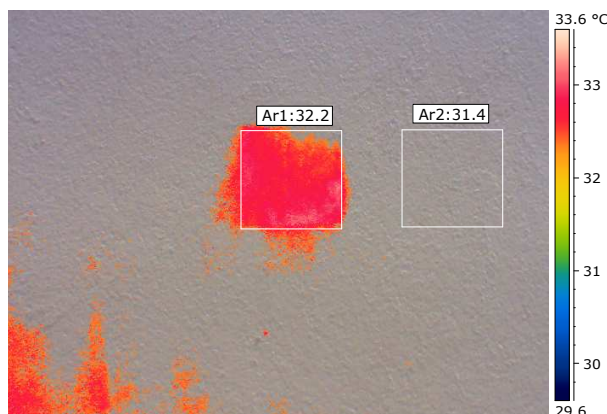


Fig. 5.55: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 13h

A figura 5.56 apresenta o mesmo exercício para a cor preta.

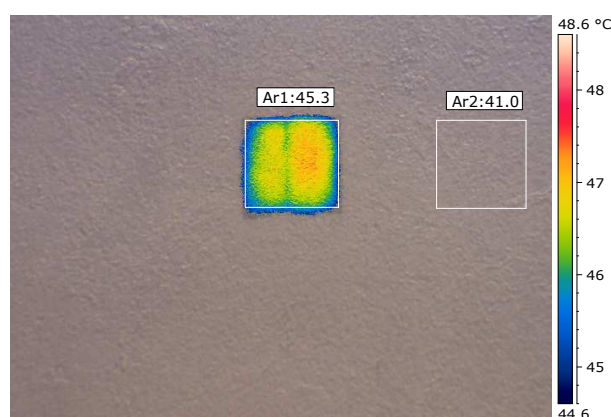


Fig. 5.56: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 13h

Nas figuras 5.57 e 5.58, apresenta-se a sobreposição da imagem real com o termograma, para a campanha termográfica das 18h30. O δT foi mantido para a cor branca (4°C) e aumentado para 8°C na cor preta, devido a uma grande amplitude de temperaturas na parede Oeste.

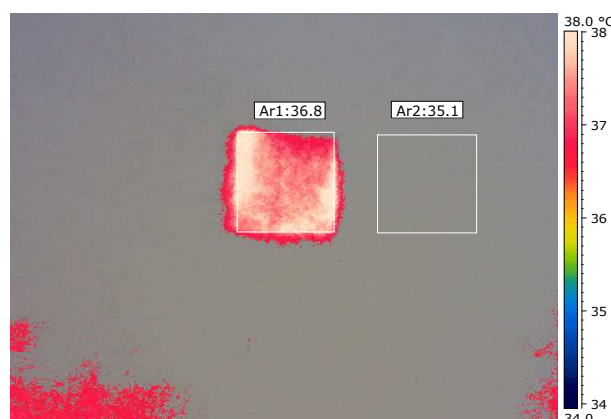


Fig. 5.57: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 18h30

A figura 5.58 apresenta o mesmo exercício para a cor preta.

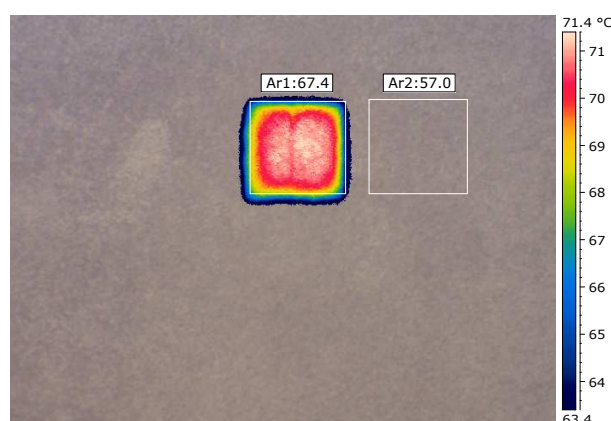


Fig. 5.58: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30

No período das 18h30 verificou-se a maior diferença de temperatura entre tintas reflectantes e

convencionais, principalmente na cor preta, atingindo-se um máximo de $\approx 10^\circ\text{C}$.

As figuras 5.59 e 5.60 apresentam a sobreposição da imagem real com a termográfica, para a campanha termográfica das 20h30, mantendo-se igualmente o $\delta T = 4^\circ\text{C}$.

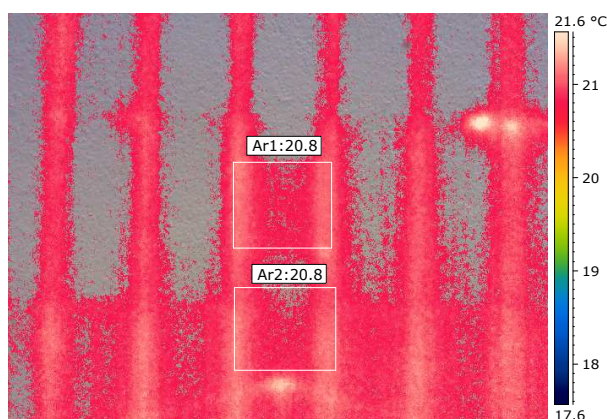


Fig. 5.59: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor branca da parede Oeste, às 20h30

A figura 5.60 apresenta o mesmo exercício para a cor preta.

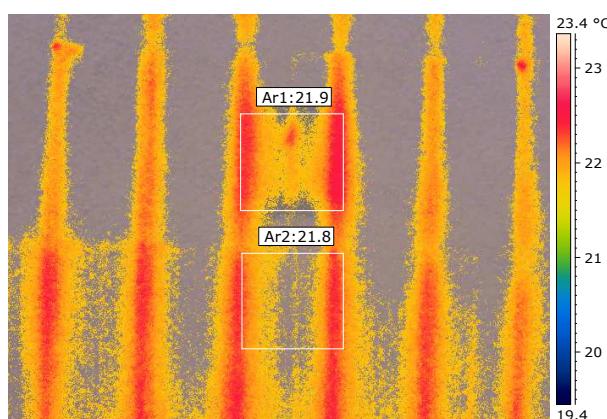


Fig. 5.60: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30

Tal como foi salientado anteriormente, neste período do dia, a termografia permite não só determinar a temperatura superficial mas também visualizar o “interior” da parede. Modificando o δT , é possível melhorar a resolução da imagem termográfica, originando uma melhor definição dos elementos constituintes da parede. Este facto é possível devido às diferentes propriedades térmicas dos materiais, que determinam a maior ou menor emissão de energia térmica que, captada pela câmara termográfica, se traduz em zonas de temperatura mais elevada ou baixa na termografia. Estas zonas, mais ou menos quentes, tomam a forma dos elementos emissores de calor, originando imagens térmicas como as das figuras 5.59 e 5.60, onde é possível identificar os varões de aço que constituem a armadura da parede e até os termopares instalados na parede.

Os dados termográficos recolhidos acima, quando analisados tendo em conta as condições atmosféricas e de ensaio, permitem uma avaliação aprofundada das temperaturas superficiais obtidas e o porquê do valor destas.

Na figura 5.61 apresenta-se a evolução, ao longo do dia, da temperatura superficial para a cor branca, do tipo reflectante (BrT) e convencional (BrN).

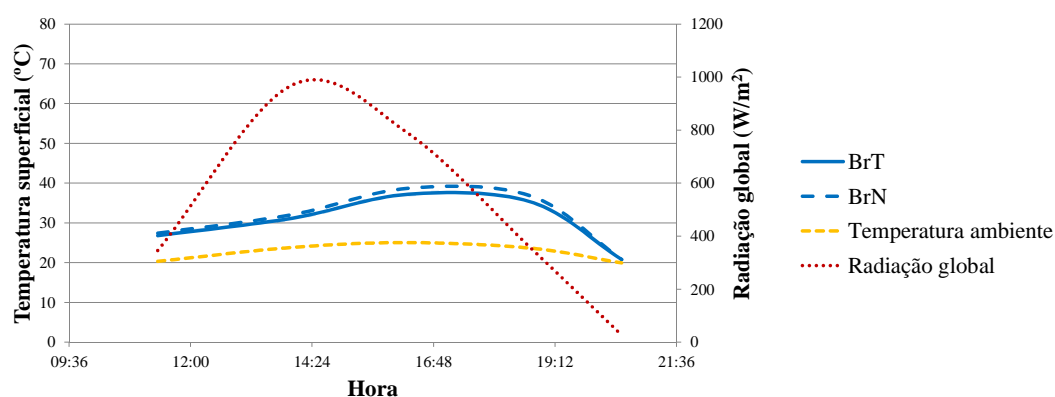


Fig. 5.61: Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Oeste

Analisando a figura 5.61 verifica-se a tendência observada em ensaios anteriores, obtendo-se valores superiores de temperatura para a tinta convencional. A diferença entre os dois tipos de tintas, no início e final do dia (11h e 20h30), não é muito pronunciado, visto corresponder aos períodos nebulados que se verificaram durante o dia de inspecção. É perceptível que, quando a radiação global aumenta ou diminui, o mesmo acontece com a temperatura superficial.

Quando se compara o gráfico da figura 5.61 com o da figura 5.62 é possível verificar a diferença de temperaturas alcançadas, entre cores e tipos de tinta.

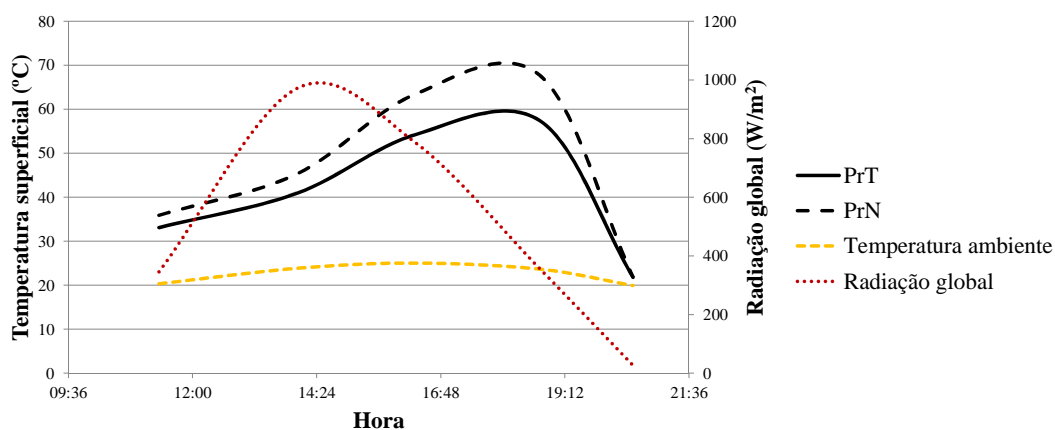


Fig. 5.62: Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Oeste

Observando o quadro 5.34, verifica-se que a cor preta apresenta uma diferença de temperatura superior entre tipos de tinta. Atinge-se uma diferença de temperatura máxima entre preto convencional e reflectante de 10,4 °C e na cor branca de apenas 1,7 °C.

Quadro 5.34: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste

Parede	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)	$\Delta T_{TeN-TeT}$ (°C)	$\Delta T_{BrN-BrT}$ (°C)
Oeste	10,4	2,1	1,7

Observando o gráfico da figura 5.63 verifica-se que a cor telha convencional (TeN) encontra-se num patamar intermédio entre as cores branca e preta convencionais.

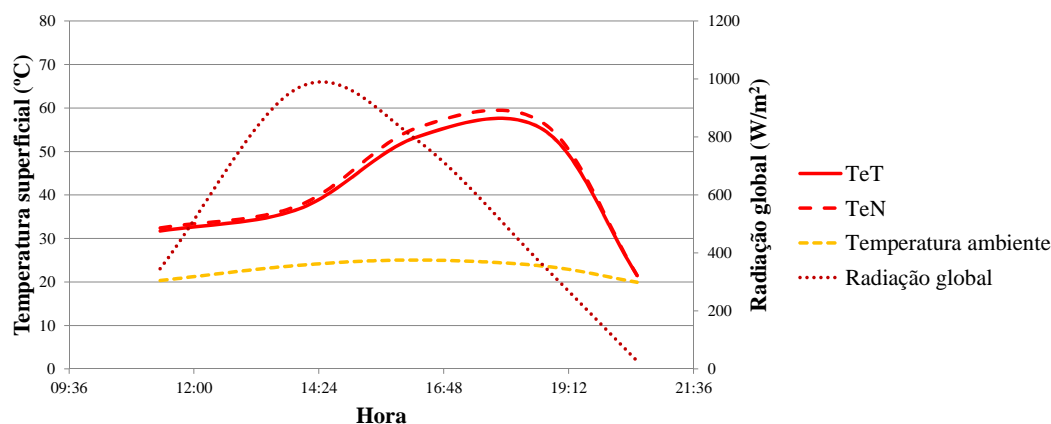


Fig. 5.63: Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Oeste

O mesmo não é verificado para a cor telha reflectante (TeT), constatando-se que diferença máxima de temperatura entre o PrT e TeT na parede Oeste é menor: $\approx 4,1^{\circ}\text{C}$ (quadro 5.35). Quando o mesmo raciocínio é feito para as tintas convencionais correspondentes (TeN e PrN) esta diferença aumenta ($\approx 11,2^{\circ}\text{C}$).

Quadro 5.35: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes nas paredes Sul e Oeste

Parede	$\Delta T_{\text{PrT}-\text{BrT}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{\text{TeT}-\text{BrT}} (^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{\text{PrT}-\text{TeT}} (^{\circ}\text{C})$
Sul	14,4	12,7	2,2
Oeste	22,1	19,7	4,1

Desta forma, é perceptível o efeito positivo que as tintas reflectantes apresentam na redução da temperatura superficial, mesmo para cores mais escuras. A diferença máxima de temperatura entre cores é ainda mais acentuada quando se compara a cor branca e preta. Entre o BrT e PrT existe uma diferença máxima de temperatura de $\approx 22^{\circ}\text{C}$, enquanto que para o BrN e PrN, tal como foi visto anteriormente para cores mais escuras, esta diferença aumenta, cingindo-se em $\approx 30,9^{\circ}\text{C}$.

Os dados obtidos permitem concluir que a aplicação de tintas reflectantes contribui para a redução da temperatura superficial da fachada, principalmente em cores mais escuras; por exemplo para a cor preta obtêm-se uma redução de $\approx 10^{\circ}\text{C}$. A escolha da cor e tipo de tinta é por isso determinante, para os valores atingidos de temperatura superficial na parede. Se, por exemplo, for aplicada numa parede orientada a Oeste, uma tinta branca reflectante (BrT) em vez de uma preta convencional (PrN), pode ser possível obter reduções de $\approx 32,4^{\circ}\text{C}$ na temperatura superficial, em condições atmosféricas de céu nebulado.

2ª Inspeção termográfica: 16/08/2013

Pretendeu-se com esta inspeção verificar o desempenho das tintas em estudo, averiguar a aplicabilidade do método e a qualidade dos resultados obtidos, em condições meteorológicas de céu limpo (figura 5.64), para as quais é previsível um melhor desempenho das tintas reflectantes.



Fig. 5.64: Condições meteorológicas às 11h - 2ª inspecção

Tal como na inspecção termográfica anterior, foi verificada a concordância dos valores de temperatura superficial obtidos pela Termografia e pelos termopares. Observou-se que a diferença entre a temperatura superficial obtida pela Termografia e os termopares (ΔT) foi no máximo de 3 % na parede Sul e 5 % na parede Oeste. É importante frisar que, apesar do valor máximo de ΔT ser cerca de 1,3 °C entre medições efectuadas com a Termografia e com os termopares, em termos médios, as diferenças foram $\Delta T_{\text{médio}} = 0,6$ °C e $\Delta T_{\text{médio}} = 0,5$ °C, respectivamente para a parede Oeste e a Sul. Este facto revela que, embora com o condicionamento da análise termográfica decorrer *in situ*, este método consegue uma muito boa aproximação à situação real.

Análise qualitativa

A inspecção termográfica foi realizada em condições meteorológicas diferentes da 1ª inspecção, observando-se valores mais elevados de radiação solar incidente, assim como da temperatura ambiente, típicos de um dia de céu limpo.

Pretendeu-se com esta inspecção avaliar também a evolução da temperatura superficial consoante a orientação da parede. As termografias obtidas revelam o já verificado em ensaios anteriores (secção 5.3.1), de que a temperatura superficial aumenta, ou diminui, consoante o período do dia e a orientação analisada. Exemplificando para a cor preta reflectante (PrT), é visível na figura 5.65, a variação da temperatura superficial em função da altura do dia e orientação. Por exemplo, na campanha das 13h a parede Sul apresenta valores de temperatura superficial superiores à parede Oeste. Este facto está relacionado com o ciclo solar e a incidência mais directa da radiação solar na parede Sul.

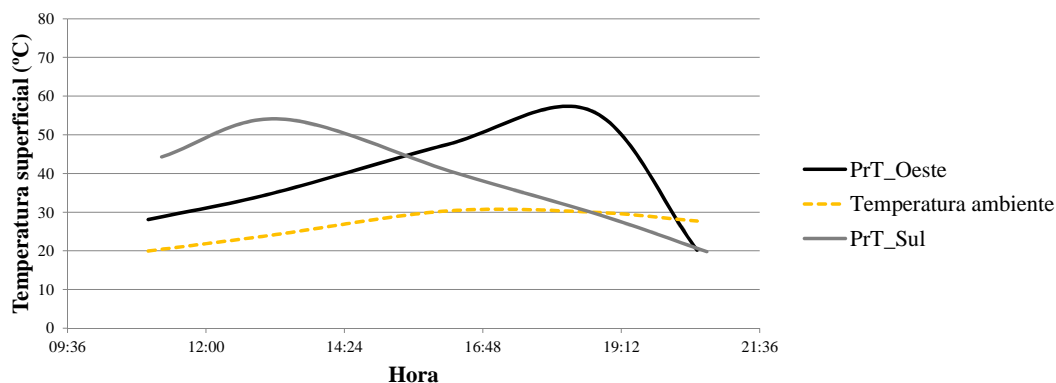


Fig. 5.65: Variação da temperatura superficial nas paredes Sul e Oeste, para a cor PrT

Assim sendo, interessa determinar qual o melhor período do dia para efectuar termografias. Para cada período do dia, consoante a orientação da parede, foram definidas gamas (ou intervalos) de temperaturas de medição (δT) para cada termografia obtida (quadro 5.36). O δT estabelecido ao longo dos quatro períodos e duas orientações não foi o mesmo, porque os padrões de temperatura foram diferentes.

Quadro 5.36: Gama de temperaturas de medição (δT) definidas consoante o período do dia e orientação

Parede	δT (°C)			
	11h	13h	18h30	20h30
Sul	20	30	20	14
Oeste	8	12	30	10

É possível verificar que os δT definidos seguem a variação da intensidade solar ao longo do dia.

Seguidamente apresentam-se os termogramas obtidos e imagens reais correspondentes, das paredes Oeste e Sul às 11h, 13h, 18h30 e 20h30.

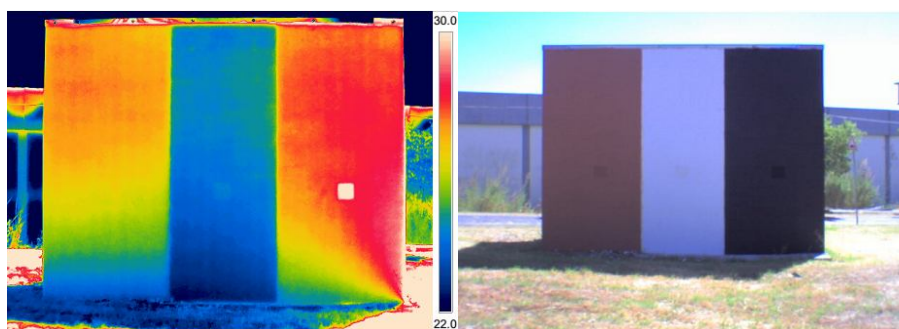


Fig. 5.66: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 11h - 2ª inspecção

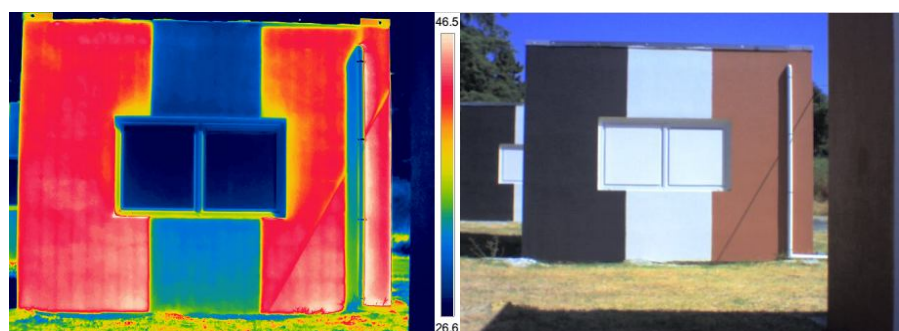


Fig. 5.67: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 11h - 2ª inspecção

É interessante, por exemplo, comparar para o mesmo período do dia (11h), as diferenças no padrão de temperaturas, entre a termografia da parede Oeste na 1ª (figura 5.52) e 2ª inspecção (figura 5.66). A incidência directa da radiação solar e a posição do Sol na 2ª inspecção (16/08/2013), provoca sombra na parede Oeste (figura 5.66). O mesmo não acontece na inspecção anterior (11/07/2013), devido ao céu nebulado que se verificava na altura do ensaio.

Desta forma, é perceptível o efeito que a sombra tem na temperatura superficial da parede, evidenciada pelo padrão térmico descontínuo da parede Oeste na 2ª inspecção, quando comparado com a 1ª inspecção

(figura 5.52). Tal como já foi referido, qualquer análise termográfica é sempre mais eficiente e fiável se, para cada imagem térmica, existir a imagem real correspondente. A figura 5.68 evidencia esse facto, pois a observação da imagem real ajuda na interpretação do termograma.

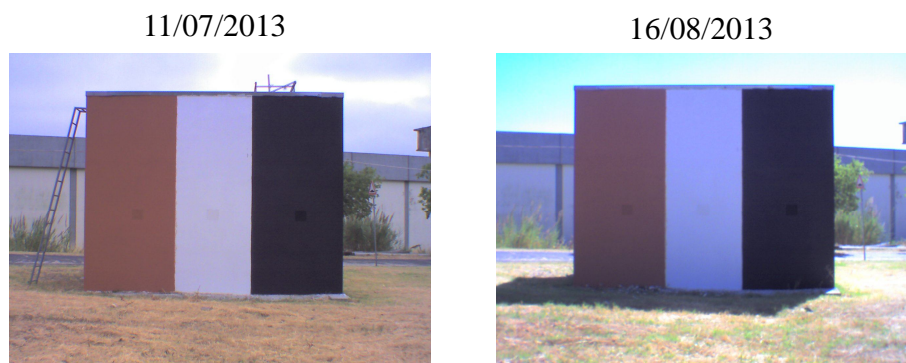


Fig. 5.68: Imagens reais da parede Oeste às 11h - 1ª (esq.) e 2ª inspecção (dir.)

Nas figuras 5.69 e 5.70 apresentam-se os termogramas e imagens reais obtidos na campanha das 13h, para as paredes Sul e Oeste.

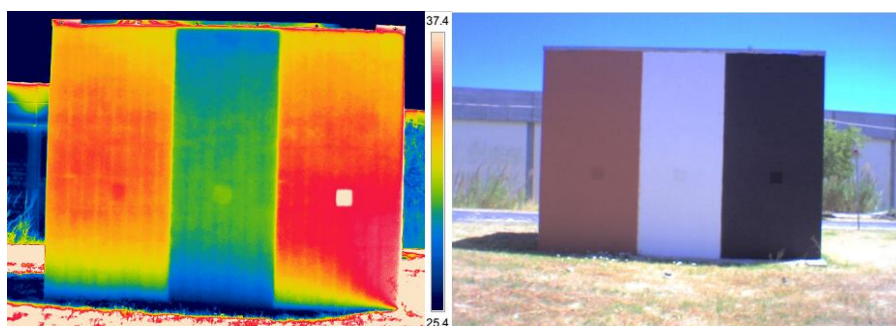


Fig. 5.69: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 13h - 2ª inspecção

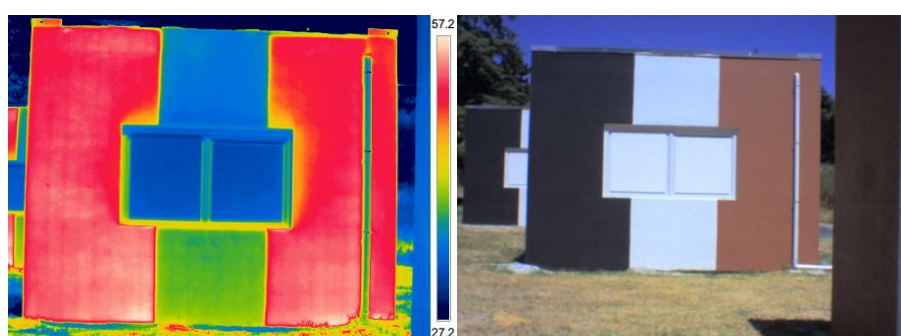


Fig. 5.70: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 13h - 2ª inspecção

Constatou-se que a parede Oeste manteve-se sombreada e a parede Sul insolada, sendo este facto evidenciado pelos termogramas obtidos. Na parede Sul, observou-se que o padrão de temperatura é praticamente uniforme em cada faixa vertical, resultado da incidência constante do Sol. Na parede Oeste, o padrão de temperatura é descontínuo, resultando principalmente do sombreamento.

No período das 18h30, a parede Oeste encontra-se insolada (figura 5.71) e a parede Sul sombreada (figura 5.72).

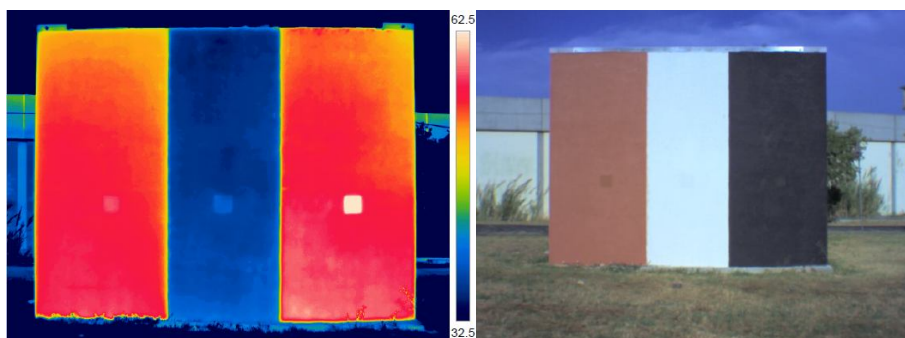


Fig. 5.71: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 18h30 - 2ª inspecção

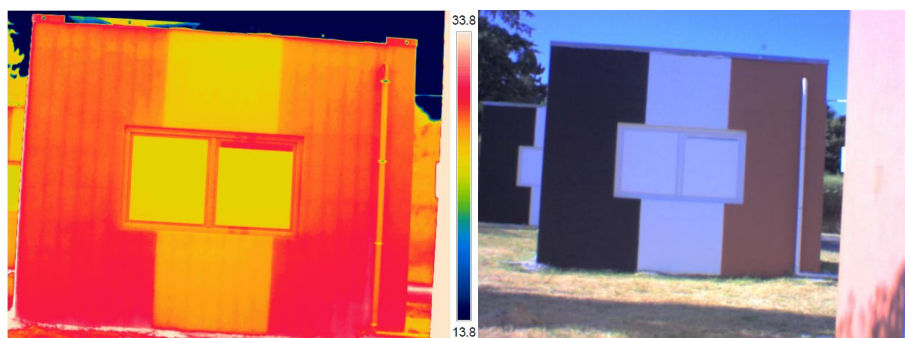


Fig. 5.72: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 18h30 - 2ª inspecção

É possível estabelecer uma relação entre os δT definidos (quadro 5.36) e a orientação da parede. A necessidade de incrementar o δT deve-se ao facto da parede, em determinadas alturas do dia, estar exposta durante mais tempo e com mais intensidade à radiação solar, aumentando, desta forma, a amplitude de temperaturas na superfície da parede. A orientação da parede e o ciclo solar são, por isso, dois factores que condicionam a exposição solar da parede.

Este facto é ainda mais evidente quando são comparados os picos de temperatura superficial do PrT, nas paredes Oeste e Sul (figura 5.65), e os δT máximos definidos no quadro 5.36. Verifica-se que estes picos coincidem nos mesmos períodos: parede Sul às 13h e parede Oeste às 18h30. A variação do δT ao longo de uma inspecção termográfica pode, desta forma, ser um bom indicador do comportamento térmico do elemento em estudo, auxiliando a análise e interpretação dos termogramas.

Seguidamente, são apresentadas as termografias e correspondentes imagens reais (figuras 5.73 e 5.74), do período das 20h30.

Tal como na 1ª inspecção, é possível verificar que o último período de medição (20h30) apresenta as melhores termografias para análise (figuras 5.73 e 5.74).

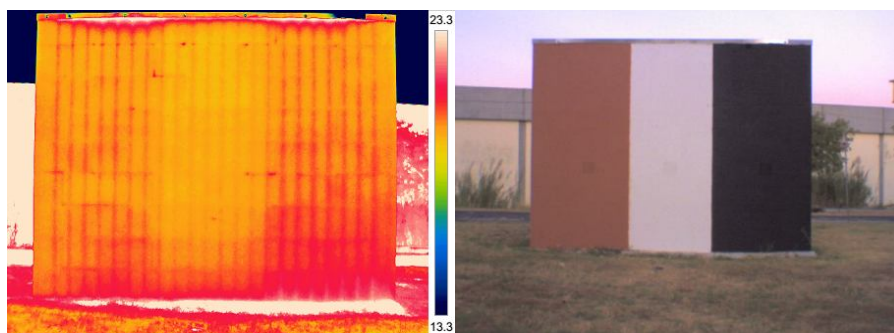


Fig. 5.73: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 20h30 - 2ª inspecção

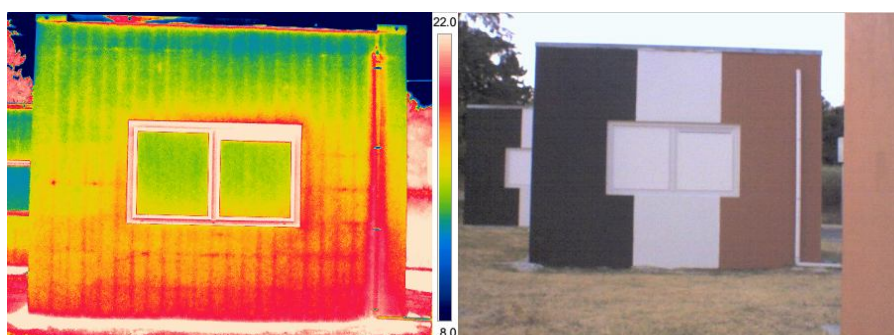


Fig. 5.74: Termograma (esq.) e imagem real (dir.) da parede Sul às 20h30 - 2ª inspecção

Quando a parede começa a arrefecer, a maior ou menor emissão de energia térmica dos vários constituintes da parede é captada pela câmara termográfica, que traduz em imagens termográficas, as zonas na superfície mais quentes e frias, evidenciando a constituição da parede.

Análise quantitativa

A análise quantitativa dos dados termográficos obtidos nesta inspecção, à semelhança da anterior, tem como objectivo quantificar a variação da temperatura superficial das paredes pintadas com tinta reflectante e convencional, assim como avaliar o comportamento destas segundo as orientações Sul e Oeste. Neste caso, a inspecção termográfica decorreu sobre condições meteorológicas de céu limpo.

A informação proveniente das termografias é complementada por dados meteorológicos, que auxiliam o investigador na análise termográfica. A figura 5.75 apresenta a variação da temperatura ambiente (T_{amb}) e radiação global (Rad_{global}) ao longo da semana de 15/08/2013 a 21/08/2013, que inclui o dia da 2ª inspecção, assim como, da última (19 de Agosto).

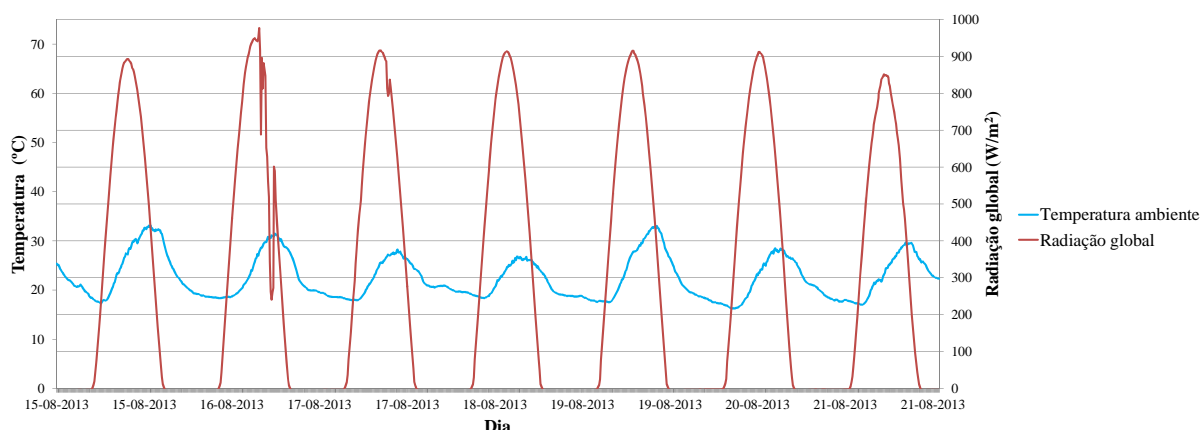


Fig. 5.75: Evolução da T_{amb} e Rad_{global} na semana 15/08/2013 a 21/08/2013

Os dados meteorológicos demonstram que, ao longo da semana, verificaram-se valores de radiação global constantes e superiores aos obtidos na 1ª inspeção. O mesmo é verificado para a temperatura ambiente, sendo a diferença de temperatura ambiente média ao longo do dia de ≈ 4 °C, entre a 1ª e 2ª inspeções.

Este facto é especialmente relevante porque permite observar, não só o comportamento térmico das tintas, mas também a sensibilidade do método termográfico, quando as superfícies são sujeitas a valores superiores de radiação solar e temperatura ambiente.

Tal como na 1ª inspeção, os dados recolhidos para este tipo de análise correspondem a termografias efectuadas a 2 metros de distância da parede Oeste e 3 metros da parede Sul, diminuindo desta forma, o erro associado à atenuação atmosférica e aumentando a resolução.

De seguida apresentam-se as termografias efectuadas na parede Oeste e Sul, na faixa vertical de cor preta, nas campanhas das: 11h, 13h, 18h30 e 20h30. Apresentam-se apenas os termogramas relativos à cor preta, pelo facto de se pretender avaliar o comportamento térmico da superfície em função da orientação e como as diferenças são mais pronunciadas com a cor preta, a análise torna-se mais clara. Seguindo o procedimento anterior, determina-se a variação da temperatura superficial em função do período do dia.

Antes de cada campanha a câmara termográfica é configurada consoante as condições termo-higrométricas e materiais avaliados (quadro 5.37).

Quadro 5.37: Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - Dia 16/08/2013

Parâmetros	11h	13h	18h30	20h30
ε	0,89 (tinta reflectante)			
	0,90 (tinta convencional)			
HR (%)	47	32	41	57
D_{obj} (m) P. Oeste	2	2	2	2
D_{obj} (m) P. Sul	3	3	3	3
$T_{refl} = T_{atm}$ (°C)	20,3	31,6	30,0	27,7

Na parede Oeste, a área de medição 1 (Ar1), situa-se sobre o quadrado pintado com tinta convencional (PrN) e a área de medição 2 (Ar2) sobre a superfície correspondente à cor reflectante (PrT). Na parede

Sul a área de medição 1 (Ar1) corresponde à zona pintada com tinta reflectante (PrT). Tal como na 1ª inspecção, efectua-se a sobreposição da imagem real com a termográfica.

Nas figuras 5.76 e 5.77 apresenta-se a sobreposição da imagem real com a termográfica, das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical de cor preta, na parede Oeste e Sul. Definiu-se um $\delta T_{Sul} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $\delta T_{Oeste} = 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, de forma a obter a melhor resolução possível. O intervalo de temperatura referido acima será mantido para as restantes campanhas, para facilitar a análise directa dos termogramas.

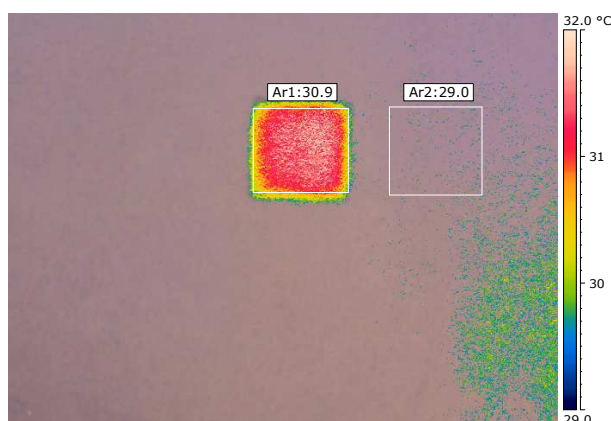


Fig. 5.76: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 11h

No quadro 5.38 é perceptível a influência da sombra na temperatura superficial da parede, verificando-se uma redução da temperatura superficial da 1ª para a 2ª inspecção de $\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Quadro 5.38: Influência do factor sombra na temperatura superficial da 1ª e 2ª inspecções, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	$T_{PrT}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$	$\Delta T_{PrN-PrT}\text{ (}^{\circ}\text{C)}$
1ª	11h	Nebulado	Oeste	sombreada*	33,1	2,8
2ª	11h	Limpo	Oeste	sombreada	29,0	1,9

* Situação de sombreamento por fraca luminosidade e/ou forte nebulosidade

O estado *sombreada** refere-se à situação de sombreamento da parede devido à fraca luminosidade e forte nebulosidade. Relativamente ao estado *sombreada* refere-se à sombra provocada pela posição do sol.

Embora na 1ª inspecção a radiação solar não incidisse directamente na parede, pois era dispersa e atenuada pela nebulosidade, verificou-se que mesmo assim, apresentava valores de temperatura superficial superiores à 2ª inspecção.

É interessante comparar a diferença entre os $\Delta T_{PrN-PrT}$ da 1ª e 2ª inspecção. Observa-se que a temperaturas superficiais mais elevadas, correspondem maiores diferenças de temperatura entre a tinta reflectante e convencional da mesma cor.

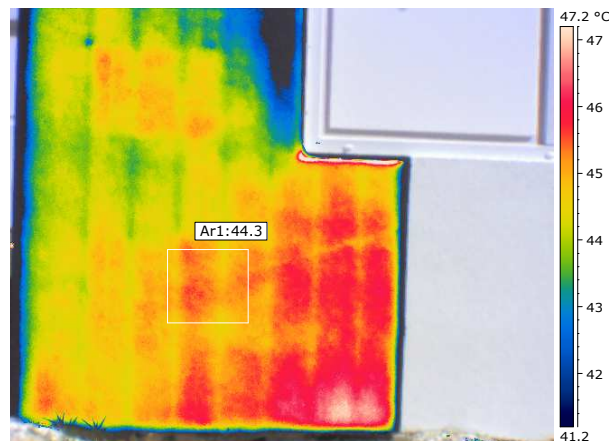


Fig. 5.77: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 11h

Analisando o quadro 5.39 constata-se o que foi referido anteriormente, relativamente à incidência solar.

Quadro 5.39: Comparação dos factores climáticos e temperatura superficial da 1ª e 2ª inspecções, para o PrT

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	T _{amb} (°C)	Rad _{global} (W/m ²)	T _{sup} (°C)
1ª	11h	Nebulado	Sul	20,5	345,6	34,2
2ª	11h	Limpo	Sul	20,3	745,5	44,3

Comparando as duas primeiras inspecções relativamente à parede Sul, na faixa de cor PrT, observa-se que a incidência mais directa e “desobstruída” do Sol verificada na 2ª inspecção, originou temperaturas superficiais mais elevadas que na 1ª, apresentando uma diferença de temperatura entre inspecções de $\approx 10^\circ\text{C}$.

As figuras 5.78 e 5.79 apresentam a sobreposição da imagem real com a termográfica às 13h, da parede Oeste e Sul, respectivamente.

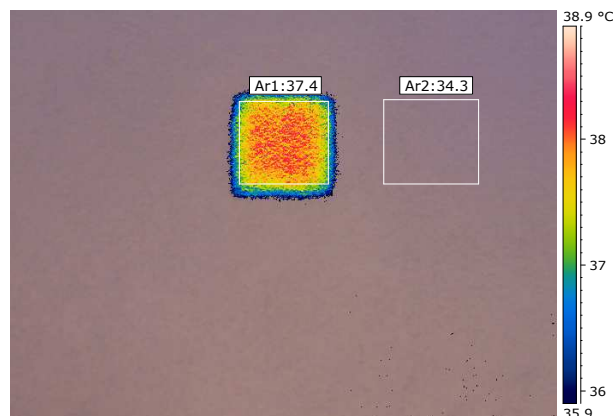


Fig. 5.78: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 13h

A manutenção do $\delta T_{Sul} = 6^\circ\text{C}$ e $\delta T_{Oeste} = 3^\circ\text{C}$ permite comparar directamente as termografias dos diferentes períodos. Observa-se que não existe grande diferença no padrão de temperatura superficial evidenciado nas termografias obtidas às 11h e 13h; no entanto as temperaturas superficiais às 13h são mais elevadas, como seria de esperar, principalmente na parede Sul.

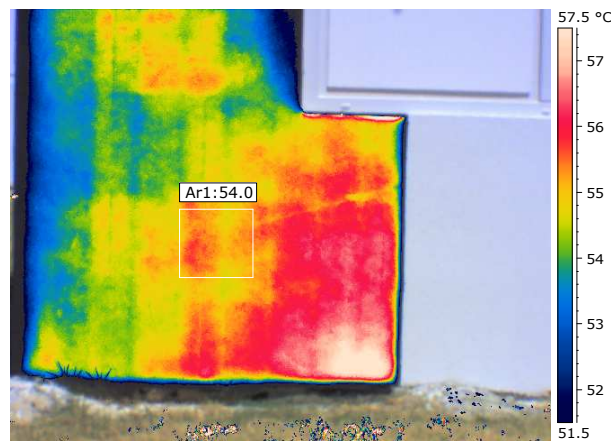


Fig. 5.79: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 13h

Em ambas as campanhas (11h e 13h) verifica-se que na parede Oeste, a superfície onde foi aplicada tinta reflectante (PrT) se encontra a uma temperatura inferior à zona pintada (Ar1) com a tinta convencional correspondente (PrN), visível no quadro 5.40.

Quadro 5.40: Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h e 13h, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T_{PrT} (°C)	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)
2 ^a	11h	Limpo	Oeste	sombreada	29,0	1,9
2 ^a	13h	Limpo	Oeste	sombreada	34,5	3,1

Apesar de estarem à sombra, quer às 11h, quer às 13h, o $\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C) às 13h é cerca de 3°C, superior ao valor obtido às 11h. Na parede Sul apenas estão aplicadas tintas reflectantes mas é possível verificar que a zona junto ao solo está mais quente. Igualmente, é notório o incremento da temperatura superficial, atingindo-se 54°C às 13h - um aumento de $\approx 10^\circ\text{C}$, relativamente ao período das 11h.

As figuras 5.80 e 5.81 apresentam a sobreposição da imagem real com a termográfica às 18h30, da parede Oeste e Sul, respectivamente. Manteve-se o $\delta T_{Sul} = 6^\circ\text{C}$ mas para a parede Oeste este foi incrementado para 10°C .

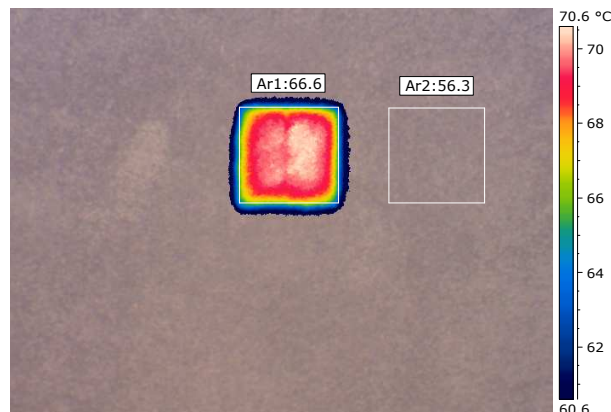


Fig. 5.80: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30

Analisando o quadro 5.41, verifica-se que às 18h30, a diferença de temperatura convencional/reflectante

($\Delta T_{PrN-PrT}$) é \approx três vezes superior ao valor obtido, às 13h. Este facto indica que, ao aumento da temperatura superficial, está associado um aumento do diferencial de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais correspondentes, verificando-se ainda que este não se mantém constante ao longo do dia.

Quadro 5.41: Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h, 13h e 18h30, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T_{PrT} (°C)	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)
2ª	11h	Limpo	Oeste	sombreada	29,0	1,9
2ª	13h	Limpo	Oeste	sombreada	34,5	3,1
2ª	18h30	Limpo	Oeste	insolada	56,3	10,3

Na parede Sul (figura 5.81) observa-se que a temperatura superficial diminuiu relativamente às 13h. O termograma obtido apresenta um padrão cromático mais uniforme, sinónimo de temperaturas idênticas na superfície do elemento. A partir desta altura do dia, começa a ser possível identificar com maior facilidade, os constituintes da parede.

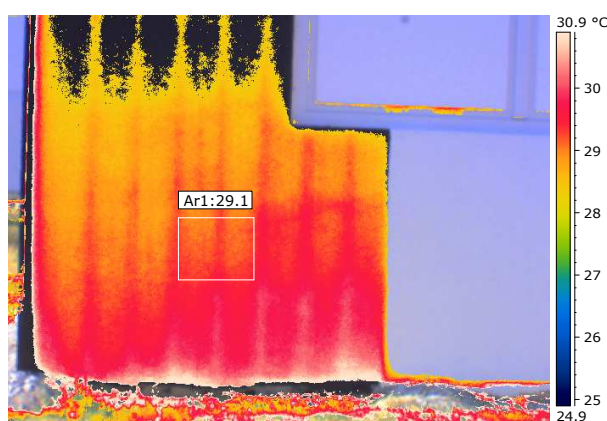


Fig. 5.81: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 18h30

Seguidamente, as figuras 5.82 e 5.83 apresentam a sobreposição da imagem real com a termográfica às 20h30, da parede Oeste e Sul, respectivamente.

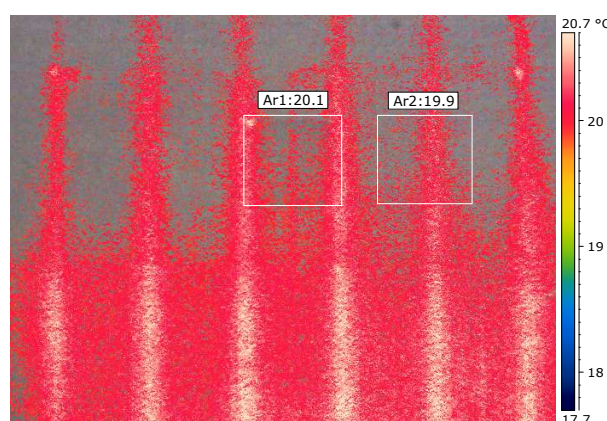


Fig. 5.82: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30

Efectuando a comparação do padrão térmico desta campanha (figura 5.82) com as anteriores (figuras 5.76, 5.78 e 5.80), verifica-se que são muito distintos. Na figura 5.82 já não é possível distinguir a zona

pintada com tinta reflectante e convencional. Neste período, a parede está apenas a emitir energia que acumulou ao longo do dia.

Visto que ambos os tipos de tinta apresentam emitâncias muito semelhantes, é normal que não se distingam na termografia, apresentando valores idênticos de temperatura superficial. É possível verificar que ambas as paredes (Oeste e Sul) apresentam temperaturas superficiais muito semelhantes às 20h30.

Analisando o quadro 5.42 observa-se a variação da temperatura superficial em função da altura do dia analisada, para a cor PrT.

Quadro 5.42: Comparação da temperatura superficial entre a campanha das 11h, 13h, 18h30 e 20h30, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T _{PrT} (°C)	ΔT _{PrN-PrT} (°C)
2 ^a	11h	Limpo	Oeste	sombreada	29,0	1,9
2 ^a	13h	Limpo	Oeste	sombreada	34,5	3,1
2 ^a	18h30	Limpo	Oeste	insolada	56,3	10,3
2 ^a	20h30	Limpo	Oeste	sombreada*	19,9	0,2

* Situação de sombreamento por fraca luminosidade e/ou forte nebulosidade

Na figura 5.83 observa-se que a parede Sul se encontra praticamente toda à mesma temperatura, exceptuando a zona inferior em contacto com o solo.

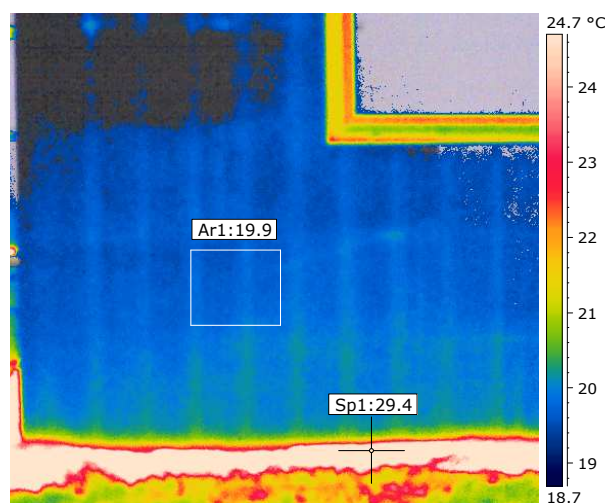


Fig. 5.83: Sobreposição imagem real - termográfica, da faixa de cor preta da parede Sul, às 20h30

Apenas a zona inferior da parede, se encontra a uma temperatura mais elevada devido à emissão reflectida a partir de outras fontes, neste caso as travessas de betão (figura 5.84), que constituem a fundação da célula experimental C5. O ponto de medição SP1 indica que a travessa de betão está a uma temperatura de 29,4 °C, mais 9,5 °C que a superfície da parede Sul.



Fig. 5.84: Pormenor da viga de fundação em betão da célula experimental C5

A análise conjunta dos dados termográficos recolhidos com as condições atmosféricas registadas na altura da inspecção, permite obter uma avaliação mais fiável da distribuição de temperatura superficial do objecto inspecionado.

Na figura 5.85 apresenta-se a evolução, ao longo do dia, da temperatura superficial para a cor branca, do tipo reflectante (BrT) e convencional (BrN), na parede Sul e Oeste, em função da temperatura ambiente e radiação global.

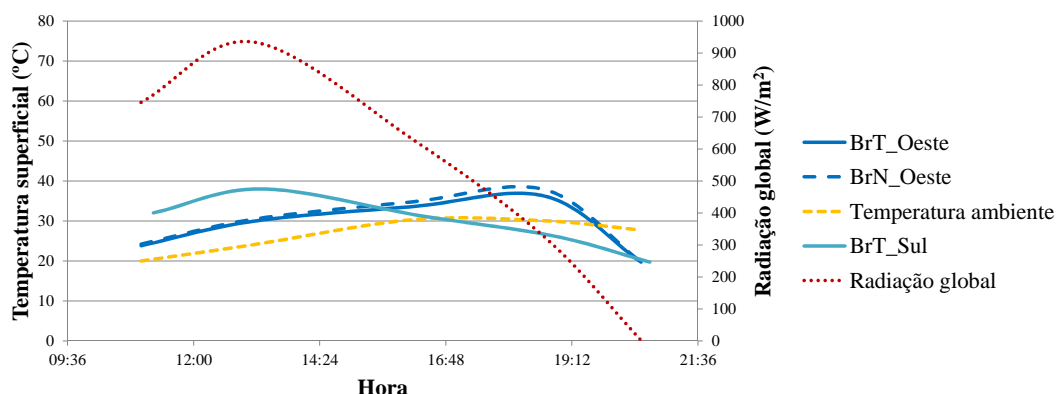


Fig. 5.85: Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Sul e Oeste

Tal como foi referido anteriormente (secção 5.3.1), a posição do Sol influencia a intensidade da radiação directa sobre fachadas e coberturas. Assim sendo, consoante o curso do Sol e as diferentes estações do ano, a intensidade da radiação solar varia consideravelmente para cada orientação. Comparando a figura 5.45, onde se apresenta a variação da intensidade da radiação solar em função da orientação e estação do ano para o hemisfério Norte, com a evolução da temperatura superficial (figura 5.85), na parede Sul e Oeste, verifica-se que apresentam comportamentos semelhantes ao longo de um dia.

Verifica-se que os picos de temperatura superficial em cada orientação - Oeste e Sul (figura 5.85) - coincidem com os períodos do dia em que a incidência solar é mais intensa relativamente a uma determinada orientação (figura 5.45), variando em função da posição do Sol (mais baixa ou mais alta). Tal como na cor branca, a temperatura superficial das superfícies preta e telha varia consoante o curso solar, em função de uma incidência mais ou menos directa na superfície (figuras 5.86 e 5.87).

Este aumento de temperatura superficial é tanto maior, quando mais escura é a cor da tinta aplicada na superfície (figuras 5.86 e 5.87).

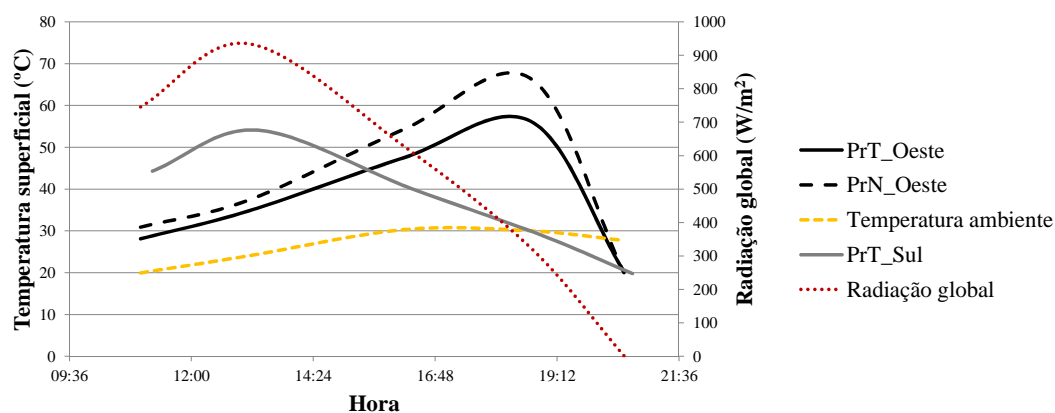


Fig. 5.86: Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Sul e Oeste

Tal como na 1ª inspecção, verifica-se que a cor preta apresenta uma diferença de temperatura superior entre tipos de tinta, do que as restantes cores (branco e telha). Analisando o quadro 5.43 verifica-se que se atinge uma diferença de temperatura máxima entre preto convencional e reflectante de 10,3°C e na cor branca de apenas 1,6°C.

Quadro 5.43: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste

Parade	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)	$\Delta T_{TeN-TeT}$ (°C)	$\Delta T_{BrN-BrT}$ (°C)
Oeste	10,3	1,3	1,6

Observando o gráfico da figura 5.87 verifica-se que os valores de temperatura da cor telha não estão muito distantes dos da cor preta.

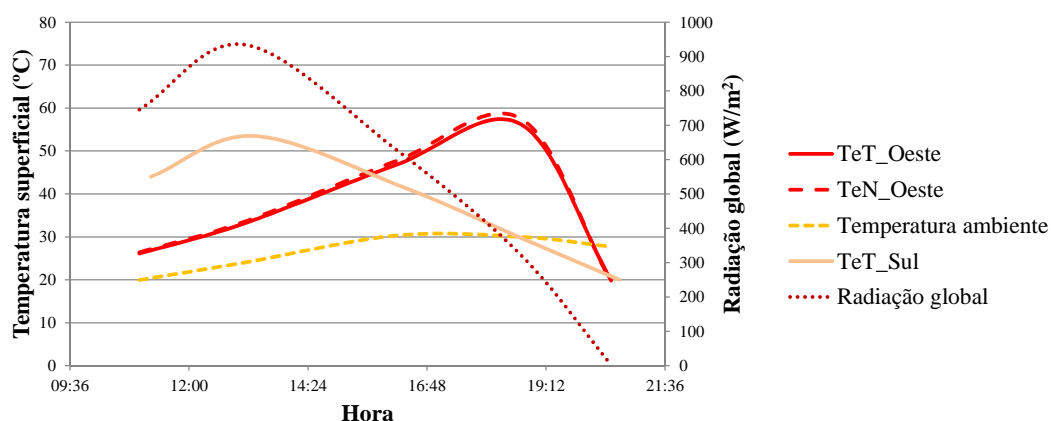


Fig. 5.87: Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Sul e Oeste

Este facto é ainda mais notório quando se compara a diferença máxima de temperatura entre cores reflectantes (quadro 5.44). Esta diferença é mínima entre cores escuras mas elevada entre cor escura e clara.

Quadro 5.44: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes na parede Sul e Oeste

Parede	$\Delta T_{PrT-BrT}$ (°C)	$\Delta T_{TeT-BrT}$ (°C)	$\Delta T_{PrT-TeT}$ (°C)
Sul	16,1	15,5	-1,4
Oeste	20	20,1	2

Efectuando o mesmo raciocínio para as tintas convencionais correspondentes (parede Oeste), verifica-se que esta diferença aumenta: $\Delta T_{PrN-BrN} = 28,6$ °C, $\Delta T_{PrN-TeN} = 8,8$ °C e $\Delta T_{TeN-BrN} = 19,8$ °C. Tal como foi verificado anteriormente, é perceptível o efeito positivo das tintas reflectantes na redução da temperatura superficial, mesmo para cores mais escuras.

Considerar a orientação do edifício revela ser um factor importante no desempenho energético do edifício e conforto dos seus ocupantes. Em termos anuais verifica-se que uma fachada orientada a Sul receberá um maior nível de radiação solar do que fachadas noutras orientações, sendo que no Verão é a fachada mais facilmente protegida dessa mesma radiação.

3ª Inspeção termográfica: 19/08/2013

A realização da 1ª e 2ª inspecções permitiu aferir a aplicabilidade e fiabilidade do método termográfico, obtendo valores de temperatura superficial muito próximos dos obtidos pelos termopares. Possibilitou o estabelecimento de uma relação entre o curso solar e a temperatura superficial da parede, em função da orientação solar. As inspecções termográficas anteriores permitiram ainda determinar a influência das condições meteorológicas (céu nebulado ou limpo) na temperatura superficial da parede.

Pretende-se com esta inspeção termográfica avaliar o desempenho térmico das tintas aplicadas na célula experimental C5, quando expostas a níveis de radiação solar idênticos e temperatura ambiente mais elevada do que nas primeiras inspecções (figura 5.75).

Na figura 5.88 apresenta-se as condições meteorológicas na altura da inspeção termográfica.



Fig. 5.88: Condições meteorológicas às 11h - 3ª inspeção

A concordância dos valores de temperatura superficial obtidos pela Termografia e termopares é igualmente efectuada para esta inspeção. Observou-se que a diferença entre a temperatura superficial obtida pela Termografia e os termopares (ΔT) é no máximo de 4% na parede Sul e 6% na parede Oeste.

O valor máximo de ΔT entre medições não é representativo porque na parede Oeste o $\Delta T_{médio} = 0,91^{\circ}\text{C}$ e na Sul $\Delta T_{médio} = 0,46^{\circ}\text{C}$.

Tomando como exemplo a cor branco reflectante (BrT), apresenta-se na figura 5.89, a evolução ao longo do dia do ΔT entre medições (termografia e termopares), das três inspecções para a parede Sul.

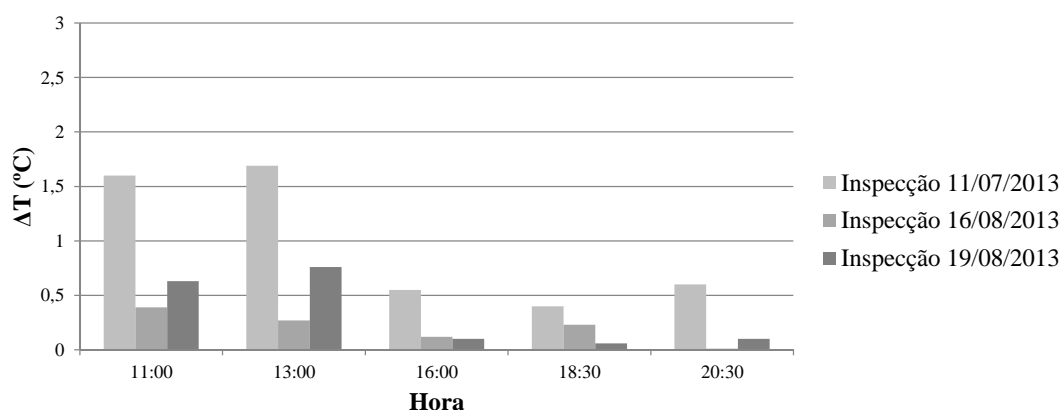


Fig. 5.89: Diferença de temperatura superficial obtida por Termografia e termopares, para a cor BrT da parede Sul, nas três inspecções termográficas

Observa-se que ocorre um decréscimo do “erro” associado à utilização da Termografia no exterior, da 1ª para a 3ª inspecção termográfica. Verificou-se que o ΔT entre os dados obtidos por Termografia e termopares é mais reduzido para as inspecções que correspondem a níveis de radiação solar e temperatura ambiente mais elevados (2ª e 3ª), assim como a tendência decrescente que apresenta ao longo do dia, para as três inspecções. Esta tendência foi igualmente verificada para as cores mais escuras, como o preto e telha reflectantes, assim como na parede Oeste, embora com diferenças ligeiramente superiores.

O quadro 5.45 apresenta a diferença de temperatura entre medições (termografia e termopares) para as três cores na parede Oeste, para quatro períodos diferentes do dia, na 3ª inspecção.

Quadro 5.45: Diferença de temperatura entre termopares e termografia para a parede Oeste na 3ª inspecção

Hora	$\Delta T_{TeT}(\%)$	$\Delta T_{BrT}(\%)$	$\Delta T_{PrT}(\%)$
13:00	4	3	3
16:00	2	0	3
19:30	1	2	2
20:30	0	2	1

Confirma-se que, à parte final do dia (campanhas das 19h30 e 20h30), correspondem ΔT menores, evidenciando os períodos mais tardios do dia como os melhores para efectuar termografias, principalmente o das 20h30.

Análise qualitativa

Nesta inspecção termográfica efectuou-se uma campanha suplementar às 19h30. Esta altura do dia (18h30 - 20h30) é especialmente crítica para a inspecção termográfica, visto a parede encontrar-se a arrefecer, emitindo a energia que será captada pela câmara termográfica e convertida em temperatura

superficial. Se a termografia for efectuada na altura errada, por exemplo, com parede completamente arrefecida, a emissão de energia é insuficiente para ser detectada ou produzir análises completas. Por esta mesma razão, efectuou-se uma campanha intermédia entre as 18h30 e 20h30, que permite avaliar este período de transição, que se torna cada vez mais curto, devido à altura do ano.

A figura 5.90 apresenta a termografia geral e imagem real correspondente da parede Oeste às 19h30.

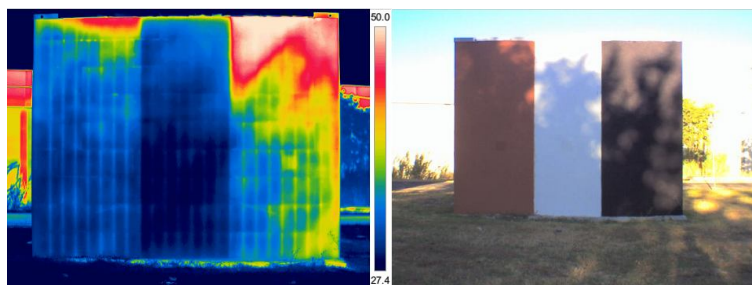


Fig. 5.90: Termografia geral (esq.) e imagem real (dir.) da parede Oeste às 19h30 - 3ª inspecção

A análise termográfica da figura 5.90, sem o apoio da imagem real, não é tão óbvia e directa. O padrão termográfico evidenciado traduz a situação real de sombreamento da parede Oeste, devido às árvores que se encontram no *campus*. Verifica-se que as zonas mais frias correspondem a zonas à sombra e as mais quentes às que ainda se encontram expostas ao sol. Em cada zona (sombreada ou não), a imagem térmica é formada pelo padrão de temperatura superficial originado pelo diferencial de temperatura verificado entre os materiais constituintes da parede. É perceptível que as zonas à sombra, embora sem atingir o equilíbrio térmico, ainda permitem visualizar a constituição da parede.

Neste caso, a escala cromática cinza apresentada na figura 5.91 permite uma melhor identificação da constituição da parede, em particular, dos blocos de EPS e a armadura no seu interior. Esta termografia permite ainda localizar os termopares instalados abaixo da superfície da parede.

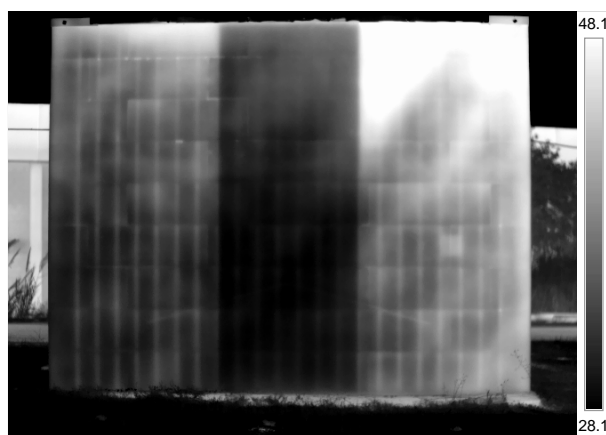


Fig. 5.91: Termografia geral em escala cromática cinza da parede Oeste às 19h30 - 3ª inspecção

O programa computacional da câmara termográfica permite utilizar diferentes escalas cromáticas, que permitem realçar as diferenças de temperatura registadas na superfície e “ver” melhor a constituição do elemento construtivo em análise.

Análise quantitativa

A análise quantitativa dos dados termográficos recolhidos nesta inspecção centrou-se nas últimas três campanhas: 18h30, 19h30 e 20h30. Anteriormente, verificou-se que os períodos referentes ao final do dia permitem obter termografias de melhor qualidade e fiabilidade, pois apresentam menores diferenças de temperatura entre medições (termografia e termopares), assim como melhor definição dos constituintes da parede.

De seguida apresentam-se as termografias efectuadas na parede Oeste, na faixa vertical de cor branca e preta, nas campanhas: 18h30, 19h30 e 20h30. Apenas os termogramas para a cor branca e preta são apresentados, visto a cor telha apresentar resultados muito semelhantes à cor preta. Pretende-se avaliar este período de transição (18h30 - 20h30), determinando-se a variação da temperatura superficial e qualidade das termografias obtidas.

Antes de cada campanha a câmara termográfica é configurada consoante as condições termo-higrométricas e materiais avaliados (quadro 5.46).

Quadro 5.46: Parâmetros introduzidos para configuração da câmara termográfica - 3ª inspecção

Parâmetros	18h30	19h30	20h30
ε	0,89 (tinta reflectante)		
	0,90 (tinta convencional)		
HR (%)	30	27	25
D_{obj} (m)	2	2	2
$T_{refl} = T_{atm}$ (°C)	32,5	29,6	26,9

Na figura 5.92 apresentam-se as termografias, das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical da parede de cor branca, na parede Oeste às 18h30. Definiu-se um $\delta T_{branco} = 5^\circ\text{C}$. A área de medição 1 (Ar1) situa-se sobre o quadrado pintado com tinta convencional (BrN) e a área de medição 2 (Ar2) situa-se sobre a superfície correspondente à cor reflectante (BrT).

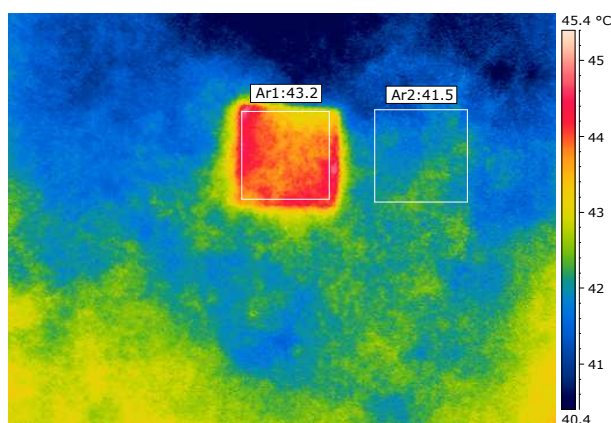


Fig. 5.92: Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 18h30

Analisando o quadro 5.47 verifica-se que na 3ª inspecção a temperatura superficial é superior, embora a diferença entre tinta reflectante e convencional seja praticamente idêntica.

Quadro 5.47: Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 18h30, para a cor branca

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T _{BrT} (°C)	ΔT _{BrN-BrT} (°C)
2ª	18h30	Limpo	Oeste	insolada	36,2	1,6
3ª	18h30	Limpo	Oeste	insolada	41,5	1,7

As cores evidenciadas no padrão térmico da figura 5.92 resultam, em primeiro lugar, do δT definido, e das condições de exposição (incidência solar e vento).

O mesmo exercício foi efectuado para a faixa preta (figura 5.93), estabelecendo-se um $\delta T_{preto} = 20^\circ\text{C}$, visto verificar-se uma elevada amplitude de temperatura na superfície.

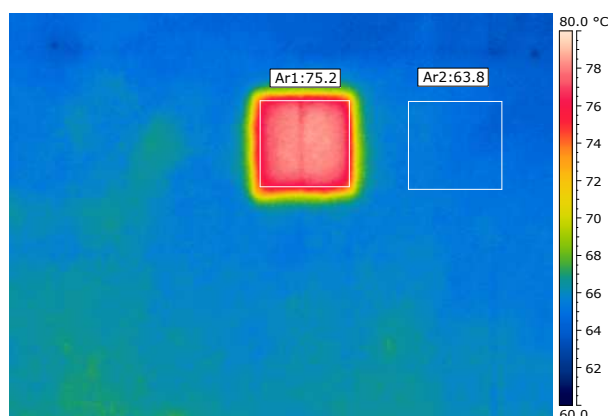


Fig. 5.93: Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 18h30

Observando a figura 5.93, verifica-se que o padrão cromático é mais uniforme, resultado de um δT mais amplo. As subtis diferenças de temperatura provocadas, por exemplo, pelo vento, são facilmente visíveis quando se reduz o δT (figura 5.92).

Analisando o quadro 5.48 verifica-se, tal como para a cor branca, que na 3ª inspecção a temperatura superficial é superior à 2ª inspecção, assim como a diferença entre tinta reflectante e convencional.

Quadro 5.48: Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 18h30, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T _{PrT} (°C)	ΔT _{PrN-PrT} (°C)
2ª	18h30	Limpo	Oeste	insolada	56,3	10,3
3ª	18h30	Limpo	Oeste	insolada	63,8	11,4

Analisando as figuras 5.92 e 5.93 observa-se que apresentam temperatura superficial diferente na zona pintada com tinta reflectante e convencional. A diferença de temperatura verificada entre tipo e cor de tinta deve-se em parte, ao maior ou menor aquecimento da superfície pela radiação solar e como resultado directo das propriedades intrínsecas da tinta (reflectante ou convencional) e da cor (branca ou preta). Tal como foi explicado anteriormente (secção 5.3.1), estes dois factores são determinantes na capacidade da superfície para reflectir grande parte da radiação solar incidente, diminuindo a parcela que é absorvida.

As figuras 5.94 e 5.95 apresentam as termografias das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical de cor branca e preta, na parede Oeste, às 19h30. Definiu-se um $\delta T_{branco} = 5^\circ\text{C}$ e reduziu-se o δT_{preto} para 10°C .

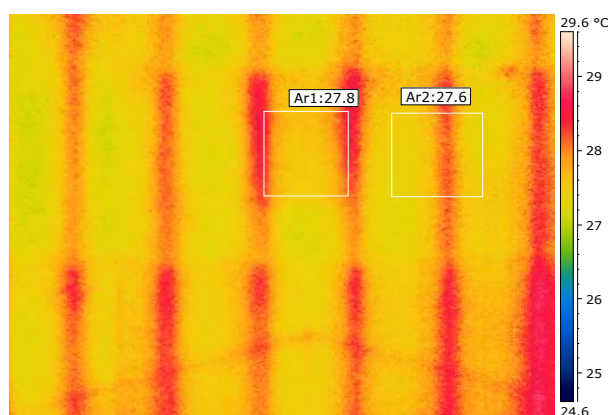


Fig. 5.94: Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 19h30

Cessado o “aquecimento”, isto é, verificada a redução da radiação solar incidente, implica que as diferenças de temperatura observadas na superfície se devem apenas às diferentes propriedades térmicas dos materiais (inércia térmica, resistência térmica, condutibilidade térmica). Estas propriedades condicionam um arrefecimento mais ou menos rápido, originando uma maior ou menor emissão de energia térmica dos vários constituintes da parede. Neste período são as propriedades térmicas e emitância dos materiais que controlam a emissão de energia e não a maior ou menor capacidade da superfície para reflectir radiação solar.

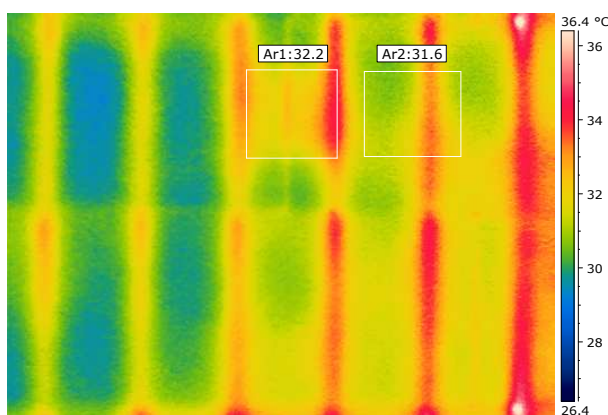


Fig. 5.95: Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 19h30

Na figura 5.94 é possível identificar não só a armadura de aço que se encontra no interior da parede, assim como os termopares que se desenvolvem em duas diagonais na termografia (vd figura 4.30). Este facto revela a importância da manipulação no software ou na câmara termográfica do δT . Esta mudança origina uma nova redistribuição de cores para uma gama mais estreita de temperatura. A alteração do δT permite vislumbrar algo que antes não era possível, pois restringe a imagem térmica a um intervalo de temperatura pretendido.

Nas figuras 5.96 e 5.97 apresentam-se as termografias das zonas pintadas com tinta convencional e reflectante na faixa vertical de cor branca e preta, na parede Oeste às 20h30. Mantendo-se os $\delta T_{branco} = 5^\circ\text{C}$ e $\delta T_{preto} = 10^\circ\text{C}$, é possível observar a diferença entre termogramas da mesma faixa, num espaço temporal de apenas 1 hora.

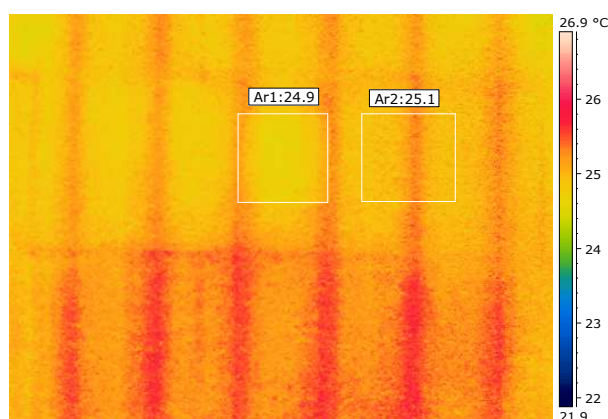


Fig. 5.96: Termografia da faixa de cor branca da parede Oeste, às 20h30

Analisando o quadro 5.49 verifica-se que, na 3ª inspecção, a temperatura superficial é superior à 2ª inspecção, resultado das condições climatéricas, como a temperatura ambiente mais elevada e radiação solar intensa, que se verificaram ao longo da 3ª inspecção.

Quadro 5.49: Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 20h30, para a cor branca

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T _{BrT} (°C)	ΔT _{BrN-BrT} (°C)
2ª	20h30	Limpo	Oeste	sombreada*	19,7	0
3ª	20h30	Limpo	Oeste	sombreada*	25,1	-0,2

* Situação de sombreamento por fraca luminosidade

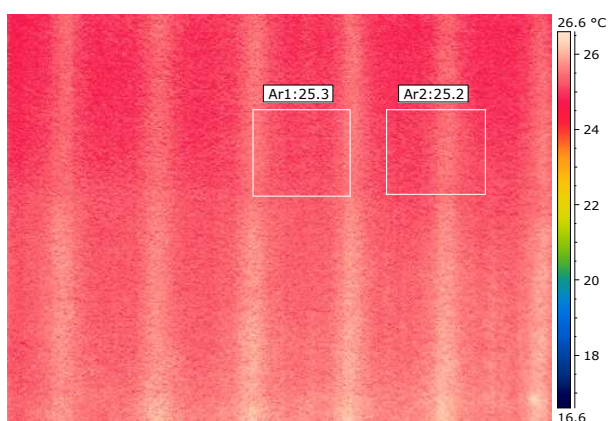


Fig. 5.97: Termografia da faixa de cor preta da parede Oeste, às 20h30

Tal como na cor branca, a cor preta revela temperatura superficial mais elevada do que na 2ª inspecção, visível no quadro 5.50.

Quadro 5.50: Comparação da temperatura superficial entre a 2ª e 3ª inspecção, às 20h30, para a cor preta

Inspeção	Campanha	Tempo	Parede	Estado	T _{PrT} (°C)	ΔT _{PrN-PrT} (°C)
2ª	20h30	Limpo	Oeste	sombreada*	19,9	0,2
3ª	20h30	Limpo	Oeste	sombreada*	25,2	0,1

* Situação de sombreamento por fraca luminosidade

No período das 20h30 a parede Oeste já não se encontra insolada, apresentando uma distribuição de temperatura mais uniforme, pois a superfície aproxima-se do equilíbrio térmico, dificultando a diferenciação dos elementos da parede. Por exemplo, na figura 5.96 já não é possível identificar os termopares, visíveis na campanha anterior (figura 5.94).

Desta forma é perceptível a importância de adaptar o método termográfico às condições do local, visto condicionarem o resultado final. Por exemplo, a melhor altura para efectuar termografias na corrente inspecção foi o período das 19h30, mas o mesmo não se verificou para a inspecção que decorreu 3 dias antes (16/08/2013) ou mesmo na 1ª inspecção (11/07/2013). Nestes casos, o período das 20h30 ainda permitiu obter termografias de qualidade. A adopção da metodologia e abordagem de uma inspecção termográfica depende, em primeiro lugar, do objectivo da análise mas também da experiência e conhecimento da técnica termográfica por parte do investigador.

Salienta-se que os períodos analisados também correspondem aos períodos do dia em que a diferença de temperatura medida por termografia e termopares é menor. A inspecção termográfica apresenta maior precisão quando é realizada em períodos onde a emissão de energia é maior, verificando-se que a medição da temperatura superficial obtida pela termografia aproxima-se da obtida pelo termopar à medida que se avança para períodos mais tardios (quadro 5.45).

Na figura 5.98 apresenta-se a evolução da temperatura superficial ao longo da inspecção termográfica, para a cor branca, do tipo reflectante (BrT) e convencional (BrN), nas paredes Oeste e Sul.

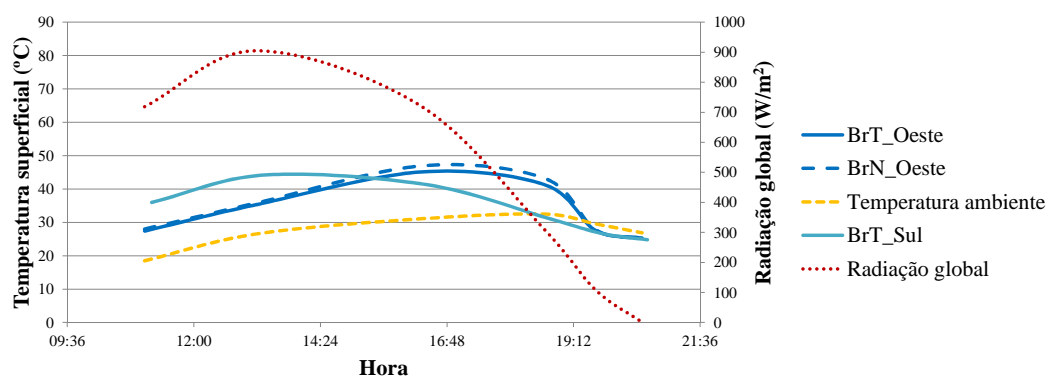


Fig. 5.98: Variação da temperatura superficial para a cor branca na parede Sul e Oeste

Tal como na cor branca, a temperatura superficial da superfície preta (figura 5.99) e telha (figura 5.100) varia consoante o curso solar, em função de uma incidência mais ou menos directa na superfície. Na 3ª inspecção verifica-se para as três cores, maiores amplitudes de temperatura superficial do que nas duas primeiras inspecções, resultado das condições climatéricas existentes durante as campanhas.

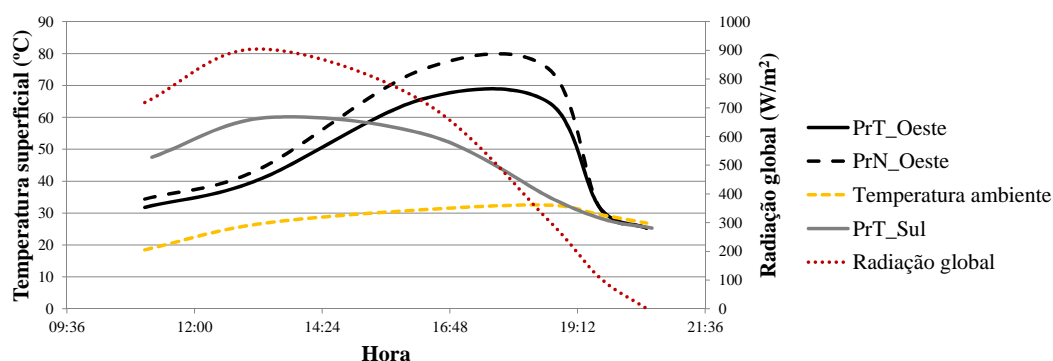


Fig. 5.99: Variação da temperatura superficial para a cor preta na parede Sul e Oeste

Tal como na 1ª e 2ª inspeção, verifica-se na 3ª inspeção que cor preta apresenta uma diferença de temperatura superior entre tipos de tinta, do que as restantes cores (branco e telha). Analisando o quadro 5.51 verifica-se que se atinge uma diferença de temperatura máxima entre preto convencional e reflectante de 11,4 °C e na cor branca de apenas 1,8 °C.

Quadro 5.51: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes e convencionais na parede Oeste

Parede	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)	$\Delta T_{TeN-TeT}$ (°C)	$\Delta T_{BrN-BrT}$ (°C)
Oeste	11,4	1,5	1,8

Analisando as figuras 5.99 e 5.100, entende-se que a pintura da fachada de um edifício com uma cor escura pode ser muito desvantajosa para o desempenho térmico e conforto dos ocupantes, devido ao facto de, superfícies deste tipo de cores, atingirem elevados valores de temperatura superficial. Por exemplo, a temperatura superficial da cor preta convencional (PrN) é $\approx 2,3$ x superior à temperatura ambiente às 18h30. Embora seja prejudicial para o desempenho, a aplicação de uma tinta preta reflectante (PrT) pode diminuir em 11,4 °C a temperatura superficial, quando comparada com a correspondente convencional.

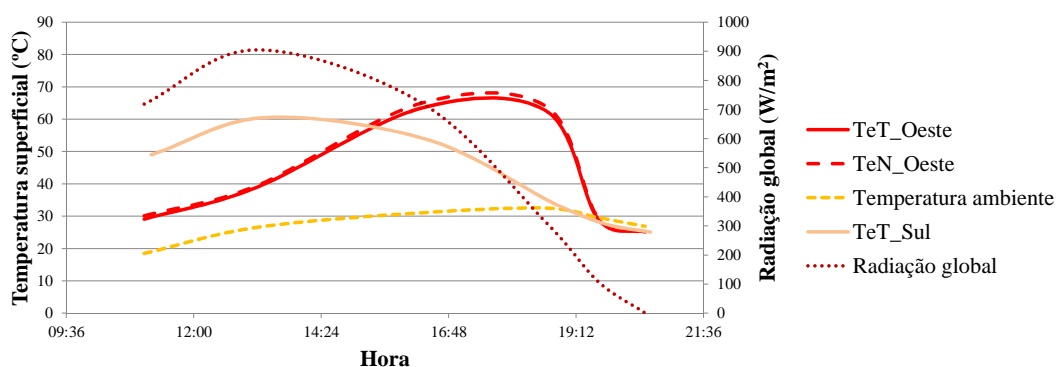


Fig. 5.100: Variação da temperatura superficial para a cor telha na parede Sul e Oeste

A diferença máxima de temperatura entre cores reflectantes (quadro 5.52) é mínima para cores escuras mas muito elevada entre cor escura e clara.

Quadro 5.52: Diferença máxima de temperatura superficial entre cores reflectantes na parede Sul e Oeste

Parede	$\Delta T_{PrT-BrT} (^{\circ}C)$	$\Delta T_{TeT-BrT} (^{\circ}C)$	$\Delta T_{PrT-TeT} (^{\circ}C)$
Sul	15,7	16,3	-1,5
Oeste	23,5	21,1	2,7

Efectuando o mesmo raciocínio para as tintas convencionais correspondentes (parede Oeste), verifica-se que esta diferença aumenta: $\Delta T_{PrN-BrN} = 32,1 ^{\circ}C$, $\Delta T_{PrN-TeN} = 11,5 ^{\circ}C$ e $\Delta T_{TeN-BrN} = 20,6 ^{\circ}C$.

Desta forma, é possível verificar o efeito positivo que a aplicação de tintas reflectantes tem na redução da temperatura superficial, mesmo para cores mais escuras. Para superfícies expostas a radiação solar, a escolha da cor é um factor determinante no desempenho térmico da parede, particularmente em período de Verão. Observou-se que a diferença de temperatura superficial $\Delta T_{PrN-BrT}$ atinge $34 ^{\circ}C$, para uma temperatura ambiente e radiação global de $32,5 ^{\circ}C$ e $309,09 W \cdot m^{-2}$ respectivamente.

5.3.3 Síntese dos resultados

Os resultados obtidos em condições reais de exposição revelam que um sistema de pintura reflectante apresenta valores de reflectância superiores, quando comparado com um sistema de pintura convencional.

A associação de um sistema de pintura reflectante a uma fachada, principalmente quando orientada a Sul, permite diminuir os ganhos térmicos através da envolvente opaca em período de Verão. Verificou-se que a aplicação de uma tinta reflectante, possibilita reduzir em $\approx 10^{\circ}C$ a temperatura superficial da parede (cor preta), quando comparada com a correspondente tinta convencional. No Inverno, a posição do sol é mais baixa e a radiação solar menos intensa. Neste período a exposição solar é mais reduzida (número de horas de luz menor), contribuindo para a diminuição do total de energia que atinge a superfície, minorando a influência que a tinta reflectante poderá ter no aumento do consumo de energia para aquecimento.

Com o intuito de perceber a influência das condições climáticas no desempenho, não só das tintas reflectantes mas também do próprio método termográfico, foram realizadas três inspecções termográficas. A realização de cada inspecção, permitiu avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes em diferentes condições de exposição (1ª inspecção), assim como analisar os diferentes factores influenciadores, como a orientação solar, a radiação solar e a temperatura ambiente (2ª inspecção) ou a variação destes, em períodos do dia mais tardios (3ª inspecção).

No quadro 5.53, apresenta-se o resumo das diferenças de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais, nos vários períodos do dia analisados, assim como das condições climáticas verificadas.

Em cada inspecção são destacadas as diferenças máximas de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais correspondentes. O vento é um factor importante na temperatura superficial da parede e afecta naturalmente as medições termográficas mas, como é visível no quadro 5.53, ao longo das três inspecções verificaram-se velocidades do vento semelhantes.

Quadro 5.53: Síntese da diferença de temperatura entre tintas reflectantes e convencionais para as três inspecções, na parede Oeste

Inspeção	Campanha	$\Delta T_{PrN-PrT}$ (°C)	$\Delta T_{TeN-TeT}$ (°C)	$\Delta T_{BrN-BrT}$ (°C)	V_{vento} (m/s)	T_{amb} (°C)	Rad_{global} ($W \cdot m^{-2}$)
11/07/2013	11h	2,8	0,7	0,6	0,00	20,5	345,6
	13h	4,4	0,8	0,9	0,61	24,3	970,9
	16h	9,2	2,1	1,5	0,77	25,0	787,6
	18h30	10,4	1,5	1,7	0,66	23,8	356,0
	20h30	0,1	0	0	0,72	19,4	27,1
16/08/2013	11h	1,9	0,3	0,4	0,20	20,3	745,5
	13h	3,1	0,4	0,5	0,73	31,6	934,5
	16h	6,8	0,9	1,2	0,78	30,3	628,4
	18h30	10,3	1,3	1,6	0,79	30,0	323,8
	20h30	0,2	-0,3	0	0,70	27,7	1,6
19/08/2013	11h	2,6	1	0,6	0,67	18,5	718,5
	13h	3,2	0,5	0,5	0,66	26,5	904,7
	16h	9,3	1,5	1,8	0,72	31,1	721,5
	18h30	11,4	1,4	1,7	0,74	32,5	309,1
	19h30	0,6	0,4	0,2	0,74	29,6	108,6
	20h30	0,1	-0,2	-0,2	0,78	26,9	0,6

No período analisado (Verão), torna-se necessário minimizar os ganhos solares, uma vez que o sol incide com maior intensidade e o nº de horas de exposição solar é maior em todas as orientações, sendo que a horizontal (coberturas), recebe o maior nível de radiação [GONÇALVES & GRAÇA, 2004]. Tal como foi referido no ensaio do piranómetro (secção 5.3.1) a posição do sol neste período, próxima do zénite, apresenta um ângulo de incidência com a normal de valor mais elevado. O que significa que a incidência solar faz-se com grandes ângulos que, por exemplo, numa fachada orientada a sul, reduz os ganhos solares.

Os resultados obtidos revelam que é plausível, assumir as vantagens inerentes ao uso deste tipo de tintas numa fachada, quando inserida numa estratégia bioclimática, cujo planeamento melhore as condições de conforto no interior dos edifícios.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo é apresentada uma síntese das principais conclusões e considerações tecidas ao longo da dissertação, de forma sucinta, de modo a não o tornar redundante face ao corpo principal do trabalho.

6.1 Considerações finais

A presente dissertação foi desenvolvida com o intuito de avaliar o desempenho térmico de tintas reflectantes quando aplicadas em fachadas. Primeiramente foi necessário caracterizar as propriedades radiativas das tintas reflectantes e convencionais em laboratório, avaliando-se de seguida, o seu desempenho quando sujeitas a condições reais de exposição. Para esse efeito, adoptou-se, entre outros, um método de análise não destrutivo: Termografia de infravermelhos. A avaliação em laboratório e *in situ* permitiu uma caracterização abrangente do comportamento e factores que influenciam o desempenho térmico de tintas reflectantes, assim como do método termográfico adoptado.

6.1.1 Tinta reflectante

Com os resultados obtidos constatou-se que as tintas reflectantes apresentam reflectância total superior às tintas convencionais correspondentes, principalmente no infravermelho próximo (NIR). Os resultados revelam que a constituição da tinta reflectante, principalmente ao nível do tipo e dimensão do pigmento utilizado, permite aumentar consideravelmente a reflectância no NIR, mantendo ou diminuindo, a absorção no Visível (VIS). Consequentemente, um sistema de pintura reflectante absorve menos energia solar, o que permite manter a superfície a uma temperatura mais baixa e reduzir a transferência de calor para o interior da envolvente.

A escolha da cor revela ser um factor importante na temperatura superficial da fachada, obedecendo por isso, a requisitos não só estéticos, mas também funcionais. Como seria de esperar, verificou-se que cores mais claras apresentam reflectâncias mais elevadas que cores escuras. Verificou-se, igualmente, que a cor cinza, criada no âmbito deste trabalho, é uma alternativa interessante à cor telha, constatando-se valores de reflectância superiores.

Os resultados demonstraram igualmente, que tintas de cor mais clara apresentam temperaturas superficiais mais baixas que, cores escuras, quando expostas a radiação solar. Este facto é reforçado quando o aquecimento da superfície pintada é efectuado em laboratório por condução ou por radiação infravermelha, numa gama de comprimento de onda muito estreita, constatando-se que

não existe praticamente diferença de temperatura superficial entre a tinta reflectante e convencional, independentemente da cor. Relativamente ao tipo de superfície (rugosa ou lisa), observou-se que embora a superfície lisa apresente uma reflectância superior à superfície rugosa, a diferença é mínima.

Em laboratório foi igualmente verificada a influência do ângulo de incidência da luz na reflectância, e a sua variação. Observou-se que as tintas reflectantes e convencionais apresentam valores de reflectância superiores quando a luz incide perpendicularmente à superfície, aumentando de valor à medida que se incrementa o ângulo.

Relativamente ao desempenho térmico de tintas reflectantes, quando expostas em condições reais, comprovou-se o que já tinha sido observado em laboratório. A orientação e ciclo solar, são dois factores que condicionam a intensidade da radiação solar incidente na fachada e, consequentemente na capacidade de esta reflectir. Verificou-se que, durante os períodos de exposição solar directa, a propriedade radiativa que permite baixar a temperatura superficial é a reflectância. Terminado o aquecimento natural da fachada (períodos tardios do dia) passa a ser, a maior ou menor emitância e as propriedades térmicas do material, a determinar o arrefecimento radiativo e a quantidade de radiação térmica que é emitida para o ambiente.

Verificou-se que os picos de temperatura superficial atingidos nas fachadas, para cada orientação, coincidem com os períodos do dia em que a incidência solar é mais intensa. Como seria de esperar, a cor preta apresentou a maior diferença de temperatura superficial entre uma tinta reflectante e convencional: $\approx 11^{\circ}\text{C}$.

Neste contexto, pode-se assumir que existem vantagens inerentes ao uso de tintas reflectantes, não só ao nível da poupança energética e financeira, resultante do menor consumo de energia necessária para arrefecimento, mas também, ao nível da durabilidade da solução construtiva de revestimento de fachada ETICS.

A exposição prolongada a cargas térmicas elevadas, associada aos factores atmosféricos (raios UV, vento, precipitação), provoca o desgaste da superfície, e consequente degradação. Este desgaste pode ser minorado com a aplicação de um sistema de pintura reflectante, pois este permite reduzir consideravelmente a temperatura superficial, contribuindo para a diminuição da carga térmica, principalmente nos períodos onde se verifica maior intensidade solar.

Em suma, os ensaios realizados permitiram constatar que a aplicação de um sistema de pintura reflectante em fachadas pode constituir uma solução válida na redução da temperatura superficial, possibilitando a diminuição dos ganhos térmicos através da envolvente, situação vantajosa no Verão. Este tipo de solução (passiva) revela ser de fácil aplicação e de custo relativamente baixo, permitindo igualmente, diminuir o risco de perda das propriedades isolantes do sistema ETICS, garantido a sua funcionalidade e manutenção.

6.1.2 Método termográfico

A Termografia é uma técnica de análise não-destrutiva, rápida e que permite operar à distância. Os resultados obtidos permitem concluir que, tomadas as devidas precauções, a Termografia revela ser um método eficaz e relativamente preciso na determinação de temperaturas superficiais em condições reais de exposição. Verificou-se que, em média (três inspecções), a diferença entre a temperatura medida por termografia e com termopares, é de 5% na parede Oeste e 4% na parede Sul.

O sucesso de uma inspecção termográfica depende, em parte, da metodologia adoptada e da experiência do operador. Constatou-se que o procedimento de ensaio utilizado nas inspecções termográficas, permitiu obter medições precisas e minorar o erro, ao garantir a repetibilidade do ensaio e ao respeitar os cuidados enunciados na secção 3.2.1.

A determinação dos padrões de temperaturas superficiais possibilita, não só a quantificação da temperatura superficial, mas também a identificação de zonas críticas na envolvente. Constatou-se que a Termografia pode ser utilizada como ferramenta de diagnóstico e monitorização da qualidade do elemento construtivo, ao permitir “ver” o que a olho nu não é possível.

Em suma, o êxito de uma inspecção termográfica a um edifício, passa por respeitar os seguintes factores:

- Metodologia - A interpretação das termografias depende da abordagem adoptada, em que a sua escolha varia com o objectivo da inspecção termográfica;
- Material - Tentar determinar as condições gerais do edifício, tipo de construção e dos materiais existentes;
- Ambiental - Escolher as condições ambientais que permitem obter os resultados a que se destina a inspecção.

No fundo, o factor englobante que garante a qualidade de uma termografia acaba por ser a experiência do técnico que efectua a inspecção. Sobre este, reside a responsabilidade de definir a metodologia e a configuração do equipamento a adoptar, assim como de interpretar os termogramas obtidos.

O estudo desenvolvido procurou responder a todos os objectivos inicialmente propostos. Os resultados obtidos contribuíram ainda para a possível optimização do método, assim como para o apuramento das vantagens da sua utilização. Nesse sentido, indicam-se de seguida, alguns desenvolvimentos futuros deste trabalho.

6.2 Sugestões para desenvolvimentos futuros

De forma a expandir o conhecimento nesta área de investigação considera-se importante o desenvolvimento futuro dos seguintes aspectos:

- avaliar o envelhecimento/degradação de tintas reflectantes e os seus principais parâmetros;
- avaliar o impacto efectivo no consumo energético e financeiro de uma habitação, resultante da aplicação de um sistema de pintura reflectante;
- avaliar a melhor solução construtiva de fachada para a optimização do desempenho térmico de tintas reflectantes;
- quantificar a redução de temperatura no interior da habitação, resultante da aplicação de tintas reflectantes;
- analisar o desempenho térmico de uma habitação quando aplicado um sistema de pintura reflectante, na cobertura e nas fachadas;
- desenvolvimento de novas metodologias de inspecção termográfica.

Bibliografia

- ACEPE (2013). *Associação Industrial do Poliestireno Expandido*. <http://www.acepe.pt/pt/index.php/eps/propriedades-qualidades>. [Online; acesso 08-Novembro-2013]
- ALDEIAS, A. (2003). *Termografia infravermelha*. Documento de apoio às aulas de Métodos Experimentais em Energia e Ambiente. Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa.
- ALVES, J. (2013). Impermeabilização e isolamento térmico de coberturas em terraço, sistemas construtivos e patologias. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- APT (2014). *Composição de tintas*. <http://www.aptintas.pt/composicao.aspx>. [Online; acesso 04-Fevereiro-2014].
- ASTM (1999). *ASTM E 1933-99a*. Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers.
- ASTM (2004). *ASTM C 1371-04a*. Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers.
- ASTM (2009). *ASTM C 1549-09*. Standard test method for determination of solar reflectance near ambient temperature using a portable solar reflectometer.
- ASTM (2012a). *ASTM E 903-12*. Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres.
- ASTM (2012b). *ASTM G 173-03*. Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface.
- AVDELIDIS, N. & MOROPOULOU, A. (2004). Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures. *Journal of Cultural Heritage*, 5(1), 119–127.
- B & K Instruments, (1978). *Luminance Reflectantes*. Luminance Reflectantes - Application Notes.
- BARACCANI, D. (2012). *La termografia: una tecnica di controllo non distruttivo*. Elaborato Finale Di Laurea, Università di Bologna. Cesena.
- BARREIRA, E. (2004). Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- BERDAHL, P. & BRETZ, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials. *Energy and Buildings*, 25(2), 149–158.
- BRETZ, S. & AKBARI, H. (1997). Longterm performance of high-albedo roof coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159–167.
- BRETZ, S., AKBARI, H., & ROSENFELD, A. (1998). Practical issues for using solar reflective materials to mitigate urban heat islands. *Atmospheric Environment*, 32(1), 95–101.
- CASTRO, A. (2002). Análise da refletância de cores de tintas através da técnica espectrofotométrica. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas.
- CHENG, V., NG, E., & GIVONI, B. (2005). Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy*, 78(4), 528–534.
- CORTIZO, E. (2007). *Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnóstico de anomalias em edificações*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- COSTA, M. A. D. (em curso). *Conforto térmico de Verão em edifícios de habitação - Processos de transmissão de calor em regime variável - no contexto climático da Europa do Sul*. Tese de Doutorado, FCT-UNL.
- COVALLERO, A. (2011). *La termografia all'infrarosso negli apparecchi elettrici ed elettronici*. Elaborato Finale Di Laurea, Università Degli Studi di Padova. Padova.
- DEVICES & CO, S. *Manual do utilizador - Model AE1*.
- DIAS, D. I. P. (2008). Radiation control coatings. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- DL (1951). Decreto-lei nº 38382, de 7 de agosto de 1951, *Regulamento Geral das Edificações Urbanas (RGEU)*. Imprensa nacional - Casa da Moeda. Lisboa, 1988.
- DL (2013). Decreto-lei nº 118, de 20 de agosto de 2013, *Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)*. Diário da República, 1ª série. Lisboa, 2013.
- DORNELLES, K. (2008). *Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas.
- D.SEKER (1996). Evaluation of exterior building surface roughness degrees by photogrammetric methods. *Building and Environment*, 31(4), 393–398.
- EDIS, E., FLORES-COLEN, I., & DE BRITO, J. (2014). Passive thermographic detection of moisture problems in façades with adhered ceramic cladding. *Construction and Building Materials*, 51, 187–197.
- FEUP (2013). *Espectrofotometria de tintas reflectantes*. Dados de ensaio de espectrofotometria. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- FLIR (2007). *Manual do utilizador - ThermaCAM reporter*.

- GLUCKLICH, I. D. (2013). *Fundamentals of Ecological Planning and Building*.
<http://www.ecobine.de/print.php?SESSID=5d7092d85d384778d6c3226dcb5d3204&id=2.5.7.1.2&kurs=11&l=en>. [Online; acesso 14-Outubro-2013].
- GONÇALVES, H. & GRAÇA, J. M. (2004). *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*.
- GONZÁLEZ-AGUILERA, D., LAGUELA, S., & RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, P. (2013). Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades. *Energy and Buildings*, 65, 29–36.
- HART, J. M. (1991). *A practical guide to infra-red thermography for building surveys*. Construction Research Communications Ltd.
- HERBST, W. & HUNGER, K. (2004). *Industrial Organic Pigments: Production, Properties, Applications*. Wiley - VCH.
- HITACHI (1991). *Manual do equipamento - Model U-3000/U-3300 Spectrophotometer*.
- IKEMATSU, P. (2007). Estudo da refletância e sua influência no comportamento térmico de tintas refletivas e convencionais de cores correspondentes. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- LEHMANN, B., GHAZI WAKILI, K., FRANK, T., VERA COLLADO, B., & TANNER, C. (2013). Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. *Applied Energy*, 110, 29–43.
- LEVINSON, R., BERDAHL, P., & AKBARI, H. (2005). Solar spectral optical properties of pigments - part i: model for deriving scattering and absorption coefficients from transmittance and reflectance measurements. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89(4), 319–349.
- LEVINSON, R., BERDAHL, P., & AKBARI, H. (2007). Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(4), 304–314.
- LI-COR. *LI-200SA Pyranometer Sensor*.
- LI-COR (1990). *LI-189 Quantum/Radiometer/Photometer Operating Manual*.
- LMT. *Manual do equipamento - Esfera integradora LMT RT500*.
- MAAS, J. H. (1972). *Basic infrared spectroscopy*. Heyden and Sons Ltd.
- MADALGUE, X. (2001a). *Infrared and Thermal Testing*. American Society for Nondestructive Testing, INC.
- MADALGUE, X. (2001b). *Theory and practise of infrared technology for nondestructive testing*. John Wiley and Sons.

- MATIAS, L. (2001). Avaliação do desempenho térmico de protecções reflectantes aplicadas em coberturas inclinadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Lisboa.
- MATIAS, L. (2004). *Aplicação da análise termográfica em edifícios antigos na Amieira do Tejo e em Viana do Alentejo*. RELATÓRIO 270/2004 - Projecto FCT nº POCTI/ECM/46323/2002. LNEC.
- MATIAS, L. (2014). *Curso de técnicas de ensaio para inspeção de estruturas*. Termografia de Infravermelhos: Aplicação em edifícios. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- MODEST, M. F. (2003). *Radiative heat transfer*. Academic Press.
- OKE, T., JOHNSON, D., STEYN, D., & WATSON, I. (1991). Simulation of surface urban heat island under ideal conditions at night - part 2: diagnosis and causation. *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 339–358.
- PARKER, D. S. & BARKASZI, S. F. (1997). Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from florida. *Energy and Buildings*, 25(2), 105–115.
- PETTERSSON, B. (1980). *Thermography*. Swedish Council for Building Research.
- PRADO, R. & FERREIRA, F. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence on the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300.
- PRAGER, C., KOHL, M., HECK, M., & HERKEL, S. (2006). The influence of the IR reflection of painted facades on the energy balance of a building. *Energy and Buildings*, 38(12), 1369–1379.
- ROSENFELD, A. H., DING, B., AKBARI, H., & BRETZ, S. (1995). Mitigation of urban heat islands : materials , utility programs , updates. *Energy and Buildings*, 22, 255–265.
- RYER, A. (1998). *Light Measurement Handbook*. International Light Inc.
- SANTAMOURIS, M., SYNNEFA, A., & KARLESSI, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102.
- SANTOS, C. (1996). *Estudo sobre a durabilidade de placas de EPS usadas no isolamento térmico de edifícios*. Notas Técnicas: NT 23/96 e NT 24/96 - NCCT. LNEC.
- SANTOS, P. D. & MATIAS, L. (2002). *Aplicação laboratorial da análise termográfica para visualização da absorção capilar e da secagem de um provete de parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado*. RELATÓRIO 144/02 - Estudo integrado no plano de investigação programada. LNEC.
- SHEN, C. Y. (2009). *Development of improved active thermographic techniques for nondestructive inspection of building and civil engineering structures*. Tese de Doutoramento, City University of Hong Kong.

- SHEN, H., TAN, H., & TZEMPELIKOS, A. (2010). The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption - an experimental study. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 573–580.
- SILVANO, S. (2012). Medição da emissividade de superfícies à temperatura ambiente. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- SONG, Z., ZHANG, W., & SHI, Y. (2013). Optical properties across the solar spectrum and indoor thermal performance of cool white coatings for building energy efficiency. *Energy and Buildings*, 63, 49–58.
- SOUSA, M. (2004). Patologia da construção - elaboração de um catálogo. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M., & AKBARI, H. (2007a). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167–1174.
- SYNNEFA, A., SANTAMOURIS, M., & APOSTOLAKIS, K. (2007b). On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. *Solar Energy*, 81(4), 488–497.
- ZINZI, M. & FASANO, G. (2009). Properties and performance of advanced reflective paints to reduce the cooling loads in buildings and mitigate the heat island effect in urban areas. *International Journal of Sustainable Energy*, 28(1), 123–139.

Anexo A

Resultados individuais obtidos *in situ* por Termografia

A.1 Temperatura superficial medida por termografia e por termopares

Quadro A.1: Temperatura superficial medida por termografia e por termopares nas três inspeções, na parede Oeste

Parede Oeste													
Inspeção	Hora	Termografia						Hora	Termopares			Radiação Global (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
		Temperatura (°C)							Temperatura (°C)				
		TeN	BrN	PrN	TeT	BrT	PrT		TeT	BrT	PrT		
11-07-2013	11:21	32,4	27,4	35,9	31,7	26,9	33,1	11:24	30,3	25,2	30,9	346	20,5
	14:01	37,6	32,2	45,3	36,8	31,4	41,0	14:04	35,8	29,5	36,2	971	24,3
	16:18	55,5	38,7	63,4	53,4	37,2	54,2	16:14	52,2	36,7	52,9	788	25,0
	18:43	56,5	36,8	67,4	55,0	35,1	57,0	18:44	55,4	35,7	58,2	356	23,8
	20:31	21,5	20,8	21,9	21,5	20,8	21,8	20:34	21,4	20,2	21,7	27	19,4
16-08-2013	11:00	26,4	24,2	30,9	26,1	23,8	29,0	11:04	25,2	23,4	26,8	746	20,3
	13:08	33,6	30,4	37,4	33,2	29,9	34,3	13:14	32,5	29,5	34,1	935	31,6
	16:11	47,7	34,8	54,3	46,8	33,6	47,5	16:14	46,0	33,5	47,0	628	30,9
	18:41	57,6	37,8	66,6	56,3	36,2	56,3	18:44	56,0	36,5	57,4	324	30,0
	20:31	19,5	19,7	20,1	19,8	19,7	19,9	20:34	20,1	19,7	20,7	2	27,7
19-08-2013	11:04	30,1	28,0	34,4	29,1	27,4	31,8	11:04	28,2	26,5	29,9	719	20,7
	13:11	39,4	35,8	43,5	38,9	35,3	40,3	13:14	37,3	34,2	39,2	905	26,9
	16:18	65,0	46,9	75,1	63,5	45,1	65,8	16:14	62,0	45,0	64,0	722	31,1
	18:39	63,8	43,2	75,2	62,4	41,5	63,8	18:34	63,7	42,3	65,6	309	32,5
	19:37	29,5	27,8	32,2	29,1	27,6	31,6	19:44	28,9	27,1	32,5	109	29,6
	20:30	24,9	24,9	25,3	25,1	25,1	25,2	20:34	25,0	24,7	25,5	1	26,9

Quadro A.2: Temperatura superficial medida por termografia e por termopares nas três inspeções, na parede Sul

Parede Sul										
Inspeção	Hora	Termografia			Hora	Termopares			Radiação Global (W/m ²)	Temperatura ambiente (°C)
		Temperatura (°C)				Temperatura (°C)				
		PrT	BrT	TeT		PrT	BrT	TeT		
11-07-2013	11:37	34,2	28,1	35,9	11:34	32,7	25,9	32,2	373	20,7
	14:20	50,2	35,8	48,5	14:24	48,0	34,8	47,2	954	25,0
	16:33	40,2	30,5	38,0	16:34	39,1	30,2	37,6	744	25,7
	18:53	29,1	24,5	27,2	18:54	28,3	24,3	27,2	325	23,1
	20:40	21,2	20,8	21,3	20:44	20,5	19,9	20,5	10	19,4
16-08-2013	11:14	44,3	32,0	44,0	11:14	43,0	31,6	43,0	769	20,3
	13:18	54,0	38,0	53,5	13:14	53,0	37,7	52,6	940	24,0
	16:19	40,2	31,3	41,6	16:14	40,6	31,4	40,8	562	30,9
	18:52	29,1	26,2	28,9	18:54	28,8	26,0	28,7	250	29,8
	20:41	19,9	19,7	20,0	20:44	20,0	19,7	19,9	0	26,9
19-08-2013	11:12	47,5	36,0	49,0	11:14	47,0	35,4	47,1	743	21,2
	13:21	59,9	44,2	60,5	13:24	59,4	43,4	59,0	911	27,2
	16:25	54,3	41,3	53,6	16:24	53,7	41,2	53,0	695	31,3
	18:46	34,2	31,0	34,1	18:44	34,1	30,9	33,9	275	32,0
	19:45	27,8	26,6	27,6	19:44	28,0	26,7	27,7	77	28,6
	20:36	25,3	24,8	25,1	20:34	25,2	24,9	25,0	0	26,7